

Technologiebericht

6.4 Low-carbon und ressourceneffiziente Industrie innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende

Clemens Schneider (I Low-carbon Kunststoffe)

Dietmar Schüwer (II Power-to-heat)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Disclaimer:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren und Autorinnen.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Schneider, C.; Schüwer, D. (2018): Technologiebericht 6.4 Low-carbon und ressourceneffiziente Industrie. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Hinweis:

Die multi-kriterielle Bewertung und generell die Erstellung dieses Berichts basiert auf den Vorgaben, die in Teilbericht 1 beschrieben sind:

Viebahn, P.; Kobiela, G.; Soukup, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2017): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 (Kriterienraster zur Bewertung der Technologien innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES: Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Kontakt:

Clemens Schneider

Tel.: +49 202 / 2492 – 160

Fax: +49 202 / 2492 – 198

E-Mail: clemens.schneider@wupperinst.org

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie

Döppersberg 19

42103 Wuppertal

Review durch:

Patrick Selzam (Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	5
Tabellenverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	8
Zusammenfassung (Steckbrief)	10
Berichtsaufbau	12
I Low-carbon Kunststoffe	13
1 Beschreibung des Technologiefeldes	13
1.1 Steam Cracking-Prozess	13
1.2 Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen	14
2 Stand F&E in Deutschland	15
2.1 Steam Cracking	15
2.1.1 <i>Stand der Forschung in Deutschland</i>	15
2.1.2 <i>Laufende Forschung und Entwicklung</i>	15
2.2 Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen	16
2.2.1 <i>Stand der Forschung in Deutschland</i>	16
2.2.2 <i>Laufende Forschung und Entwicklung</i>	17
3 Relevanz öffentlicher Förderung	18
3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten	18
3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)	18
4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes	22
4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale	22
4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionszielen	35
4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz	37
4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz	38
4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung	40
4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich	44
4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz	47
4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit	48
4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen	50
4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität	50
5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand	53
5.1 Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture	53
5.2 Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen	53
5.3 Ergebnis der Online-Umfrage	54
II Power-to-heat	57
1 Beschreibung des Technologiefeldes	57
1.1 Power-to-Heat – Definition und Abgrenzung	57
1.2 Physikalische PtH-Verfahren und ihre Anwendungen	58

2	Stand F&E in Deutschland	62
2.1	Projekte und Forschungscluster	62
2.2	Technologiespezifische Entwicklungspotenziale	63
3	Relevanz öffentlicher Förderung	64
3.1	Kriterium 1: Vorlaufzeiten	64
3.2	Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)	65
4	Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes	70
4.1	Kriterium 3: Marktpotenziale	70
4.2	Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionszielen	80
4.3	Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz	82
4.4	Kriterium 6: Kosteneffizienz	83
4.5	Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung	84
4.6	Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich	84
4.7	Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz	86
4.8	Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit	88
4.9	Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen	88
4.10	Kriterium 12: Systemkompatibilität	89
5	F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand	92
5.1	Einzeltechnologien	92
5.2	Gesamtes Technologiefeld PtH und Wechselwirkungen mit anderen Klimaschutzstrategien	93
5.3	Ergebnis der Online-Umfrage	94
	Literaturverzeichnis	96

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

BAT	Best available technology (beste verfügbare Technologie)
BAU	Business-as-usual
BHKW	Blockheizkraftwerk
CAGR	compound annual growth rate (mittlere jährliche Wachstumsrate)
EE	Erneuerbare Energien
FCC	fluidized bed catalytic cracker
LPG	Liquefied Petroleum Gas (Flüssiggas)
MTA	Methanol-to-aromatics
MTO	Methanol-to-olefins
PtH	Power-to-Heat
WI	Wuppertal Institut
WISEE	WI Systemmodellinstrumentarium für Energie- und Emissionsszenarien

Einheiten und Symbole

%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius
CC	Carbon Capture (Abtrennung von CO ₂)
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Usage

Tabellenverzeichnis


Tab. I-1	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Hocheffizienten Steam Crackern mit Carbon Capture -----	18
Tab. I-2	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Anlagen zum Chemischen Recycling von Kunststoffabfällen -----	18
Tab. I-3	Aktuelles Entwicklungsstadium von Hocheffizienten Steam Crackern mit Carbon Capture -----	19
Tab. I-4	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Hocheffizienten Steam Crackern mit Carbon Capture -----	20
Tab. I-5	Aktuelles Entwicklungsstadium des Chemischen Recyclings von Kunststoffabfällen -----	20
Tab. I-6	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit dem Chemischen Recycling von Kunststoffabfällen -----	21
Tab. I-7	Anlagenbestand Steam Cracker in Deutschland (nach Baujahr geordnet) -----	26
Tab. I-8	Investitionsvolumen und Marktpotenzial der Technologie „Hocheffiziente SteamCracker mit Carbon Capture“ in Deutschland gegenüber dem gesamten Markt für Ersatzinvestitionen und Neubau von Steam Crackern (SC) -----	28
Tab. I-9	Investitionsvolumen und Marktpotenzial der Technologie „Hocheffiziente SteamCracker mit Carbon Capture“ gegenüber dem gesamten Markt für Ersatzinvestitionen und Neubau von Steam Crackern (SC) weltweit -----	30
Tab. I-10	Obergrenze des für Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen in Deutschland im Szenario KS80 -----	34
Tab. I-11	Obergrenze für Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen in Deutschland im Szenario KS95 -----	34
Tab. I-12	Marktpotenziale für chemisches Recycling von Kunststoffabfällen in Deutschland -----	34
Tab. I-13	Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	35
Tab. I-14	Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Gasifizierung von Kunststoffabfällen in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	36
Tab. I-15	Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch Hocheffiziente Steam Crackern mit Carbon Capture in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	37
Tab. I-16	Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch Gasifizierung von Kunststoffabfällen in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	37
Tab. I-17	Vergleich zum Kostendeckungsgrad unterschiedlicher Verfahren des rohstofflichen Recyclings im Vergleich zur thermischen Verwertung in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) -----	39
Tab. I-18	Anteile deutscher Unternehmen am Markt für Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture in Deutschland -----	42
Tab. I-19	Anteile deutscher Unternehmen am Markt für Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture weltweit -----	43
Tab. I-20	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich Hocheffizienten Steam Crackern mit Carbon Capture -----	45
Tab. I-21	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich Chemischen Recycling von Kunststoffabfällen -----	46
Tab. I-22	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Technologiefeldes Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture -----	48
Tab. I-23	Investitionsvolumina für Projekte zum Rohstofflichen Recycling von Kunststoffabfällen -----	49
Tab. I-24	Abhängigkeit des Technologiefeldes Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture von Infrastrukturen -----	50

Tab. II-1	Gliederung, technische Kenndaten und Anwendungsbeispiele für PtH-Technologien-----	59
Tab. II-2	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung am Beispiel der Stahl- (Elektroschmelzverfahren) und der Zementindustrie (elektrisch beheizter Drehrohrofen)-----	65
Tab. II-3	Aktuelle Entwicklungsstadien für PtH-Anwendungen für elektrisch erzeugten Dampf (T0) und als Brennstoffersatz für fünf beispielhafte Branchen (T1 bis T5) -----	66
Tab. II-4	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld Power-to-Heat-----	68
Tab. II-5	Einsatz kritischer Rohstoffe im Technologiefeld Power-to-Heat (Auswahl)-----	69
Tab. II-6	Technische Elektrifizierungspotenziale industrieller Branchen für unterschiedliche Temperaturbereiche-----	73
Tab. II-7	Übersicht über den tatsächlichen und den (teil-)modellierten industriellen Energiebedarf in TWh/a für Strom, Brennstoffe und Dampf und daraus abgeleitete technische Elektrifizierungspotenziale -----	76
Tab. II-8	Übersicht über technische Elektrifizierungspotenziale nach Branchen -----	76
Tab. II-9	Analyse des nationalen Marktpotenzials für das Technologiefeld Power-to-Heat am Beispiel elektrischer Dampferzeuger (TWh Endenergie Dampf) -----	79
Tab. II-10	Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für das Technologiefeld Power-to-Heat am Beispiel elektrischer Dampferzeuger (absolute Werte der Dampferzeugung aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)-----	79
Tab. II-11	Mittlere jährliche Wachstumsrate für das Technologiefeld Power-to-Heat am Beispiel elektrischer Dampferzeuger -----	80
Tab. II-12	Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Power-to-Heat (elektrischer Dampferzeuger) in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (Erdgaskessel)-----	81
Tab. II-13	Spezifische THG-Emissionsfaktoren für den Strommix-----	81
Tab. II-14	Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch Power-to-Heat (elektrischer Dampferzeuger) in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (Erdgaskessel)-----	82
Tab. II-15	Primärenergiefaktoren (PEF) für den Strommix und für Erdgas in den Klimaschutzszenarien -----	83
Tab. II-16	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefeldes Power-to-Heat -----	85
Tab. II-17	Bewertungsraster für die Akzeptanz des Technologiefeldes Power-to-Heat zum Status Quo (2015) für hybride und monovalente Ausführung-----	87
Tab. II-18	Abhängigkeit des Technologiefeldes Power-to-Heat von Infrastrukturen -----	89

Abbildungsverzeichnis

Abb. I-1	Szenario zur Entwicklung der Nachfrage nach Basischemikalien weltweit -----	23
Abb. I-2	Produktionspfade für Ethen -----	24
Abb. I-3	Entwicklung der Nettowertschöpfung bzw. der Tonnage im Bereich der Petrochemie -----	25
Abb. I-4	In Scopus verzeichnete Veröffentlichungen zu ausgewählten Suchbegriffen im Technologiefeld Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture -----	46
Abb. I-5	In Scopus verzeichnete Veröffentlichungen zu ausgewählten Suchbegriffen im Bereich Rohstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen -----	47
Abb. I-6	Abbildung der Einbindung von (hocheffizienten) Steam Crackern und von Konzepten zur rohstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen in den Stoffstromkreislauf der Olefin- (bzw. Polymer-)Produktion -----	52
Abb. I-7	Ergebnis der Online-Befragung zu Forschungsbedarf und Marktpotenzial im Technologiefeld „Low carbon Kunststoffe“ – A) Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture -----	54
Abb. I-8	Ergebnis der Online-Befragung zum Forschungsbedarf im Technologiefeld „Low carbon Kunststoffe“ -----	55
Abb. I-9	Ergebnis der Online-Befragung zu Forschungsbedarf und Marktpotenzial im Technologiefeld „Low carbon Kunststoffe“ – B) Gasifizierung von Reststoffen und Erzeugung von Synthesegas -----	56
Abb. II-1	Technologien für elektrische Wärmeerzeugung in verschiedenen Sektoren -----	58
Abb. II-2	Metaanalyse zur Identifizierung der Bandbreite der Potenziale an positiver (links) und negativer (rechts) Regelenergiebereitstellung für verschiedene industrielle Branchen -----	71
Abb. II-3	Theoretische industrielle Elektrifizierungspotenziale (TEP), differenziert nach Industriebranchen -----	72
Abb. II-4	Reduktion des PtH-Potenzials durch Ausschluss von Produktionsverbünden mit Brenngasüberschüssen -----	75
Abb. II-5	Räumliche Verteilung der modellierten industriellen Energieverbräuche (links) sowie daraus abgeleitete technische Elektrifizierungspotenziale für Dampf und Hochtemperatur-Prozesswärme (rechts) -----	78
Abb. II-6	Kosten-Potenzial-Kurve für spezifische Differenzkosten der Elektrifizierung von Prozesswärme für die Industriesegmente Papier, Stahl, Flachglas, Raumwärme & Warmwasser, Milchprodukte, Zucker und Behälterglas (v.l.n.r.) in 2050 -----	84
Abb. II-7	Anzahl nationaler und globaler Treffer einer Scopus-Publikationsrecherche für die Begriffe („power to heat“ oder „electrification“) und („industry“ oder „process heat“) -----	86
Abb. II-8	Ergebnis der Online-Befragung zu Forschungsbedarf und Marktpotenzial im Technologiefeld Power-to-Heat für Industrieprozesse (Dampferzeugung, Industrieöfen etc.) -----	95

Zusammenfassung (Steckbrief)

Technologiefeld Nr. 6.4 Low-carbon- und ressourceneffiziente Industrie	 Wuppertal Institut						
A) Beschreibung des Technologiefeldes und F&E-Bedarf							
Beschreibung des Technologiefeldes							
– A: Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture mit den Komponenten <i>Ofenwandbeschichtung, Katalytisches Cracken</i> und <i>Carbon Capture</i>							
– B: Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen mit den Komponenten <i>Pyrolyse</i> und <i>Gasifizierung</i>							
– C: Power-to-Heat (industrielle Prozesswärme) mit den Komponenten <i>Dampferzeugung</i> und <i>Sonstige Hochtemperaturwärmeerzeugung</i> in hybrider (elektrischer und fossiler) bzw. monovalenter (rein elektrischer) Ausführung							
Technologische Reife: A: Technologieentwicklung (TRL=4); B: Demonstration (TRL=7), mehrere Demoanlagen; C: Technologieentwicklung (TRL=3 bei Zement) bis Kommerzialisierung (TRL=9 bei Stahl und Glas)							
Kritische Komponenten: A: Materialforschung, CO ₂ -Abtrennung (siehe Technologiefeld 2.3); A & B: Katalysatorauswahl; C: (keine, eigentliche Aufgabe ist Prozessintegration)							
Entwicklungsziele							
– A: Effizienzverbesserung (geringerer Brennstoffeinsatz, höhere Produktausbeute)							
– B: Effizienzverbesserung (höhere Produktausbeute), Anwendung auf weitere Kunststoffe							
– C: Flexibilisierung und hybride Elektrifizierung von Prozessen via DSM, Reduktion der Investitionskosten (P _{th} allgemein) / gezielter Einsatz einer Strömungsbewegung oder -Dämpfung in konduktiven Erwärmungsprozessen (Bsp. Metallindustrie)							
Technologie-Entwicklung							
Technologie	Bestands-Potenzial*	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
A	Deutschland	Mt/a**	0	0	0-0,7	0,1-1,3	0,1-4,2
	international	Mt/a**	0	0	1-12	5-68	15-192
B	Deutschland	Mt/a**	0	0	0-0,2	0-1,2	0-2,4
	international	Mt/a**	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
C	Deutschland	TWh***	0	0	5 - 9	18 - 41	41 - 77
	international	TWh	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
* Szenario: Bandbreite KS80 bis KS95 **Jahreskapazität installierter Anlagen (A: Erzeugungskapazität Ethylen, B: Verarbeitungskapazität Kunststoffabfälle) ***nur Potenziale für elektr. Dampferzeugung (TWh Endenergie Dampf)							
F&E-Bedarf							
– A: Verbesserung der Selektivität (verminderte Koksbildung) im katalytischen Cracker und Entwicklung haltbarer und kostengünstiger Keramik zur Auskleidung der Rohrófen							
– B: Verbesserung der Selektivität, Anwendung auf gemischte Kunststoff-Abfälle und –Verbundmaterialien							
– C: Je nach Prozess eher geringe (allg.) bis höhere (Bsp. Chemie und Zementindustrie) technische Entwicklungsrisiken bei insgesamt höherem wirtschaftlichem Risiko (aufgrund preisgünstiger fossiler Referenzenergieträger Erdgas, Kohle und Ersatzbrennstoffe); F&E-Bedarf: Entwicklung branchen- und produktspezifischer Elektrifizierungslösungen (Prozess- und Systemintegration)							

B) Multikriterielle Bewertung
Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen (gegenüber Referenz)
Alle Technologien verfügen bis 2050 über ein mittleres bis sehr hohes THG-Minderungspotenzial gegenüber ihren Referenztechnologien (A: 0,09 - 3,8; B: 0 - 2,4 / C: 5,9 - 17,3 Mio. t CO ₂ -äq./a)
Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz (gegenüber Referenz)
Gegenüber Referenztechnologien bis 2050 nur relativ geringe Einsparungen (A: 1,5 - 61 / B: 0 - 14 / C _{hybrid} : 31,2 - 59,0 PJ/a) bzw. Mehrbedarf an Primärenergie (C _{monovalent} : 28,2 - 8,4 PJ/a)
Kosteneffizienz (gegenüber Referenz)
A, B, C: Relativ hohe Kostensenkungspotenziale (wenige Demo-Anlagen und mögliche Lernraten im Anlagenbau); C: hohe Betriebskosten durch Stromeinsatz; Kosteneinsparungen durch Co-Benefits
Inländische Wertschöpfung
– A: Marktanteil von 100 % in Deutschland und 25 % international möglich bis 2030 – B & C: zum jetzigen Zeitpunkt keine belastbaren Angaben möglich
Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich
– A: wettbewerbsfähig – B: geringe Wettbewerbsfähigkeit (sinkender Trend bei Anteil wiss. Veröffentlichungen) – C: deutsche Unternehmen aktiv im Bereich PtH-Anwendungen und im Ofenbau
Gesellschaftliche Akzeptanz
– A & B: Geringes Risiko für Marktakzeptanz und sozialpolitische Akzeptanz – C Hybrid: Mittlere bis hohe (Markt-) bis sehr hohe (sozialpolitische & lokale) Akzeptanz C Monovalent: sehr niedrige (Markt-) bis mittlere bzw. offene (sozialpolitische & lokale) Akzeptanz
Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit
– A: sehr hohe Pfadabhängigkeit – B: geringe Pfadabhängigkeit – C: mittlere Pfadabhängigkeit und hohe Reaktionsfähigkeit (hybrid) bis sehr hohe Pfadabhängigkeit und sehr niedrige Reaktionsfähigkeit (monovalent)
Abhängigkeit von Infrastrukturen
– A: Ggf. Aufbau einer CO ₂ -Infrastruktur – B: kaum Infrastrukturabhängigkeit, ggf. Zwischenspeicherung von Synthesegas – C: Abhängigkeit vom Ausbau von Übertragungsnetzen und EE-Erzeugungskapazitäten
Systemkompatibilität
– A & B: Für zukünftige Bereitstellung und Recycling von Kunststoffen mehrere Pfade denkbar, die teilweise auch parallel verfolgt werden können. Systemkompatibilität der Steam Cracker ist in hohem Maße von der Entwicklung der Kraftstoffmärkte/Erdölpreise abhängig, während rohstoffliche Verwertung von Kunststoffen insb. mit einer thermischen Verwertung konkurriert (im zukünftigen Stromsystem ebenfalls systemstabilisierende Rolle). – C: Bei hoher Durchdringung an PtH-Anlagen Rückwirkungen auf gesamtes Stromnetz; Ausmaß davon abhängig, ob in flexibler Fahrweise auf Stromangebot (Über- oder Unterdeckung) im Netz reagiert werden kann; PtH-Anlagen in der Grundlast erfordern zwingend überproportionalen Ausbau erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten.

Berichtsaufbau

Im Technologiefeld „Low-carbon und ressourceneffiziente Industrie“ sind verschiedene, technisch sehr unterschiedliche Technologien zusammengefasst. Ihnen gemeinsam ist, dass sie eine sehr weitgehende Dekarbonisierung des Industriebereichs ermöglichen sollen. Sie stellen somit eine Ergänzung insbesondere zu den *Technologiefeldern 2.4: CO₂-Nutzung*, *4.3: Power-to-liquids/chemicals* und *6.1: Energieeffiziente Prozesstechnologien* dar.

Im vorliegenden Bericht werden

- die hocheffizienten *Steam Cracker mit Carbon Capture*,
- das *Chemische Recycling von Kunststoffabfällen*
- sowie die Verwendung von *Power-to-Heat (PtH)* in industriellen Prozessen

untersucht. Aufgrund der Heterogenität des Technologiefeldes ist der Bericht in zwei Teile (Oberkapitel) unterteilt:

- *Oberkapitel I*: Die ersten beiden Technologien zielen insbesondere auf eine energie- und ressourceneffiziente Herstellung von Kunststoffen und sind deshalb unter dem *Oberkapitel I „Low-carbon Kunststoffe“* zusammengefasst.
- *Oberkapitel II*: *PtH* stellt eine industrielle Querschnittstechnologie dar, die quer über alle Industrie-Branchen in unterschiedlicher technologischer Ausprägung zum Einsatz kommen kann.

I Low-carbon Kunststoffe

1 Beschreibung des Technologiefeldes

1.1 Steam Cracking-Prozess

Kunststoffe, ihre Herstellung, ihre Verwendung sowie ihre Entsorgung machen einen bedeutenden Teil des industriellen Metabolismus aus. Es handelt sich dabei um synthetisch hergestellte Kohlenwasserstoffe, in der Regel auf Erdölbasis. Die hierfür notwendigen Basischemikalien Ethen (Ethylen) und Propen (Propylen) werden in einem Steam Cracker gewonnen – zu einem kleineren Anteil auch direkt aus Raffinerieprozessen (FCC-Prozess). Aufgrund der Struktur der Treibstoffnachfrage mit einem strukturellen Überhang an Nachfrage nach Mitteldestillaten sind die Steam Cracker in Europa ganz überwiegend auf einen Einsatz von Naphtha (Rohbenzin) als Edukt ausgelegt. Um Naphtha zu spalten wird es im Spaltofen schlagartig erhitzt. Als Brennstoff kommen hierfür ökonomisch niederwertige Brenngase zum Einsatz, die als Nebenprodukte des Steam Cracking entstehen. Durch die Verbrennung dieser Kohlenwasserstoffe entsteht Kohlendioxid. Steam Cracker stellen als Einzeltechnologie die größte Emissionsquelle im Bereich der chemischen Industrie dar (Fraunhofer ISI et al. 2011). Sie werden allerdings statistisch nicht vollständig erfasst, da ein Teil der Steam Cracker statistisch unter den Raffinerien erfasst wird, die auch im Europäischen Emissionshandelssystem Emissionen nur für die Gesamtheit der Anlagen ausweisen. Unter Bezugnahme auf die teilweise veröffentlichten Emissionsmenge, die Gesamtproduktion in Deutschland sowie die Produktionskapazitäten aller Steam Cracker in Deutschland dürfte das Gesamtemissionsniveau 2015 bei etwa 8 Mio. Tonnen gelegen haben.

Der spezifische Energiebedarf eines Steam Crackers ist neben der verwendeten Technologie außerdem von der Qualität des Edukts sowie von der gewünschten Produktausbeute abhängig. Die Effizienz wird in der Literatur üblicherweise in Bezug auf die Ausbeute des Hauptprodukts Ethen in Tonnen (GJ/t Ethen) oder aber in Bezug auf die Summe der ökonomisch hochwertigen Produkte (high value chemicals, abgekürzt HVC) ebenfalls in Tonnen (GJ/t HVC) angegeben.

Olefine und Aromaten können jedoch auch auf anderem Wege produziert werden. Eine inzwischen teilweise marktfähige Technologie stellen die MTO (methanol-to-olefins)- und MTA (methanol-to-aromatics)-Prozesse dar, die im *Technologiefeld 4.3: Power-to-Liquids/Chemicals* untersucht werden. Hierbei wird als Edukt Methanol verwendet, das aus Wasserstoff und Kohlendioxid bzw. Kohlenmonoxid synthetisch gebildet werden kann. Es ist jedoch zu betonen, dass der Steam Cracking-Prozess selbst dann noch eine Berechtigung haben könnte, wenn kein Erdöl mehr als Grundstoff verwendet würde. Z. B. könnten Wachse aus einem Fischer-Tropsch-Prozess (der wie Methanol auf einem Synthesegas aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid aufbaut) im Steam Cracker gecrackt werden, um Olefine und Aromaten zu gewinnen (siehe *Technologiefeld 4.3: Power-to-Liquids/Chemicals*). Aus heutiger Sicht ist ungeklärt, ob in einem dekarbonisierten Energiesystem die Methanol- oder die Fischer-Tropsch-Route günstiger wäre, da das wiederum auch vom Umfang und der Struktur der Nachfrage nach Kraftstoffen (des Verkehrs) abhängt.

1.2 Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

Aus Ethen und Propen (siehe oben) werden u. a. die Kunststoffe (Polymere) Polyethylen und Polypropylen gewonnen. Andere wichtige Ausgangsstoffe für Polymere sind Aromaten (insbesondere Toluol und Benzol), die ebenfalls als Produkte des Steam Cracking entstehen.

Nach Ablauf ihrer Produktlebenszeit, die je nach Verwendung als Verpackung oder Haushaltsgerät von wenigen Monaten bis zu mehreren Jahren dauern kann, werden Kunststoffe in Deutschland gesammelt. Das Aufkommen an Plastikmüll in Deutschland betrug im Jahr 2015 zwölf Mio. Tonnen (Plastics Europe 2016). Ein Teil der Reststoffe wird exportiert (insbesondere nach China), ein anderer Teil wird mechanisch recycelt, der Rest in Müllverbrennungsanlagen verbrannt.¹ Letztere Option stellt eine Letztverwertung der Kohlenwasserstoffe dar, als Reststoff verbleiben hier insbesondere Wasserdampf und Kohlendioxid.

Die Pyrolyse ermöglicht demgegenüber eine Zerlegung der Polymere in Monomere bzw. eine Erzeugung von Brennstoffen. Die Zerlegung geschieht meist thermisch (durch Cracken), es werden jedoch auch katalytische Verfahren erforscht.

Eine Gasifizierung bietet darüber hinaus jedoch die Möglichkeit, Wasserstoff und Kohlenmonoxid zu gewinnen, um somit ein Synthesegas zu erhalten, das als Edukt wiederum für die Kunststoffherstellung verwendet werden kann. Somit stellt die Gasifizierung von Reststoffen eine wichtige Technologie im Rahmen einer energie- und ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft dar.

Pyrolyse und Gasifizierung der Reststoffe werden heute nur im Rahmen von Demonstrationsprojekten betrieben, am Ende steht bei den heute betriebenen Anlagen aber meist auch eine thermische Nutzung des Gases.

¹ Die Deponierung von Reststoffen ist in Deutschland verboten und auch innerhalb der EU nicht mehr vorgesehen. Sie ist in einigen Mitgliedsstaaten jedoch noch gängige Praxis (vgl. Plastics Europe 2016).

2 Stand F&E in Deutschland

2.1 Steam Cracking

2.1.1 Stand der Forschung in Deutschland

Für Deutschland sind den Autoren keine konkreten aktuellen öffentlich geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich neuer Verfahren des Naphtha- Steam Cracking bekannt. Das Interesse der Petrochemischen Industrie hat sich im vergangenen Jahrzehnt von Naphtha- hin zu Ethan- Steam Cracking verlagert.

Die vormalige Lurgi AG mit Sitz in Frankfurt war ein sehr innovatives Unternehmen im Bereich des Anlagenbaus für die Petrochemie, wurde aber von Air Liquide übernommen. Es ist unklar, welche Kompetenzen bei Air Liquide in F&E in Deutschland im Bereich der Olefin-Technologien noch vorhanden sind.

Die Linde AG ist ein Anbieter konventioneller (thermischer) Steam Cracker-Technologie und auch im Bereich Gastrennung, im Besonderen auch Carbon Capture, tätig.

Japan ist inzwischen führend bei der Entwicklung katalytischer Crack-Verfahren. Dort gibt es mehrere laufende Forschungsvorhaben.

In Bezug auf Carbon Capture gibt es mehrere F&E-Projekte in Deutschland – jedoch nicht spezifisch in Anwendung auf Steam Cracker. Hier sei auf die Ausführungen zu Technologiefeld 2.3 (CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS)) verwiesen.

2.1.2 Laufende Forschung und Entwicklung

Verbesserte Materialien im Bereich der Pyrolyse-Fraktion des Steam Crackers sind in der Entwicklung. Die Pyrolyse-Fraktion besteht aus beheizten Rohren, die das Naphtha-Dampf-Gemisch durchläuft und sich dabei schlagartig erhitzt. Die hohen Temperaturen führen zur Bildung von Koks, der sich an den Rohrwänden niederschlägt und damit den Wärmetransfer behindert. Neuartige Beschichtungen der Rohrwände aus Keramik sollen die Verkokung vermindern und damit zu einer verbesserten Produkt- ausbeute und niedrigerem Brennstoffbedarf führen (Ren 2009).

Die Integration einer Gasturbine ist ebenfalls noch nicht State-of-the-Art, hier besteht aber allenfalls Entwicklungsbedarf. In der Gasturbine sollen nicht marktfähige Gase verbrannt werden, um Strom und Dampf bereitzustellen. Der Dampf kann zur Vorwärmung des Produkts eingesetzt werden. Entscheidend für die Emissionsbilanz dieser Maßnahme ist also auch, inwieweit überhaupt fossiler Strom hierdurch verdrängt werden kann. Gasturbinen können zwar sehr flexibel eingesetzt werden und sind insofern prinzipiell geeignet, als Backup in Stromsystemen mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien zu dienen. Allerdings beschränkt eine solche Betriebsweise die Nutzungsstunden, erfordert entsprechende Speicher und müsste dementsprechend als Systemdienstleistung vergütet werden.

Darüber hinaus sind weitere Verbesserungen im Bereich der Stofftrennung des Produktmixes möglich. Dabei handelt es sich jedoch nicht um Steam-Cracking-spezifische Technologien, sondern um *Querschnittstechnologien* innerhalb der chemischen Industrie wie Kompression (Tiefkühlung), Gastrennung (z. B. Membranverfahren) und Destillation.

Eine sehr viel weitergehende Maßnahme wäre die Senkung der Betriebstemperatur im Bereich des thermischen Crackens durch die Verwendung von Katalysatoren. Hier wird in der Literatur zwischen Oxiden, Zeolith-basierten Nano-Kohlenstoffröhren (carbon nano tubes) sowie SAPO-34 basierten Katalysatoren unterschieden (Sadrameli o. J.). Dabei handelt es sich um Materialien, die teilweise im Bereich des katalytischen Crackens von Raffinerieströmen (FCC) und im Bereich von MTO-Verfahren (siehe *Technologiefeld 4.3: Power-to-Liquids/Chemicals*) bereits kommerziell eingesetzt werden.

Mit katalytischen Verfahren lässt sich die Selektivität stark verbessern, d. h. die Bildung unerwünschter Beiprodukte wie Wasserstoff, LPG (Flüssiggas) etc. kann vermindert und das Verhältnis der Bildung von Ethylen und Propylen den Bedürfnissen angepasst werden. Auch entsteht damit eine größere Flexibilität hinsichtlich des Einsatzstoffes (Edukt). Im Ergebnis steigt die Energieeffizienz an, da der Energiebedarf in Bezug auf das angestrebte Produkt (und nicht in Bezug auf die Menge an Edukt) anzugeben ist. Die Grundlagen zum katalytischen Cracken von Naphtha wurden im Rahmen von Experimenten und Prozessmodellierungen erforscht. Da sie jedoch großtechnisch noch nicht angewendet wurden, besteht weiterer Entwicklungsbedarf.

In Bezug auf Carbon Capture, d. h. der Abtrennung von CO₂ aus Abgasströmen, sind den Autoren keine bestehenden Projekte speziell mit Bezug zu Steam Crackern bekannt. Durch die relativ geringe CO₂-Konzentration im Abgas handelt es sich hierbei auch nicht um *low hanging fruits*. Der CO₂-Emissionsfaktor für die im Steam Cracker eingesetzten Gase liegt bei deutschen Crackern etwa bei 54 t/TJ und spiegelt somit eine Mischung aus Methan, LPG und auch Wasserstoff wieder. Der Abgasstrom aus dem Pyrolyseofen ist somit am ehesten mit dem eines Erdgas-Dampfkraftwerkes vergleichbar (56 t CO₂/TJ). Bei Dampferzeugung aus Erdgas wird in der Literatur eine CO₂-Konzentration von 11-12 Vol. % angegeben (Görner et al. 2015). Zum Stand der Forschung zur CO₂-Abtrennung im Allgemeinen sei auf die Ausführungen zum *Technologiefeld 2.3: CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS)* verwiesen.

2.2 Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

2.2.1 Stand der Forschung in Deutschland

Auf der Forschungsprojektplattform *enargus* des BMWi konnten keine Projekte zur Pyrolyse oder Gasifizierung von Kunststoffabfällen identifiziert werden. Einzelne Anlagen sind jedoch in Betrieb, so Pyrolyseanlagen in Schkopau und Trostberg (Lindner und Hoffmann 2015). Die in den 1980er Jahren errichtete Pyrolyse-Demonstrationsanlage der BASF in Ludwigshafen sowie eine Anlage in Ebenhausen sind dagegen heute außer Betrieb. Auch die Wirbelschichtvergasungs-Demonstrationsanlage in Schwarze Pumpe (Sachsen) sowie eine 1986 errichtete Fließbettvergasungsanlage von Rheinbraun und ThyssenKrupp Uhde² bei Köln, in denen neben Kohle auch Kunststoffabfälle vergast wurden, laufen nicht mehr.

² Die davor gebaute Demonstrationsanlage wurde vom damaligen Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) gefördert.

ThyssenKrupp Industrial Solutions ist heute Inhaber des Patents für die Fließbettvergasung nach dem Hochtemperatur-Winkler-Verfahren (HTW).

Die Universität Hamburg war in den 1980er und 1990er Jahren maßgeblich an der Weiterentwicklung der Pyrolyse von Kunststoffen beteiligt.

2.2.2 Laufende Forschung und Entwicklung

Das chemische Recycling von Kunststoffabfällen mittels Pyrolyse ist ein Forschungsgegenstand, der weltweit bearbeitet wird. Bei der (ggf. katalytischen) Pyrolyse von Plastikabfällen entstehen als Produkt Alkane und Alkene (Al-Salem et al. 2009; Brems et al. 2012). Nur die Alkene (C_nH_n) lassen sich über Polymerisation in Kunststoffe verarbeiten, während die Alkane (C_nH_{n+2}) als Brennstoff bzw. Treibstoff verwendet werden können oder zunächst gecrackt werden müssten (z. B. in einem Steam Cracker) um Alkene zu erhalten.

Eine weitergehende Behandlung stellt die Gasifizierung dar: Bei der Gasifizierung wird das Polymer weitgehend in seine Grundbausteine, d. h. Kohlenstoff (als gasförmiges Kohlenmonoxid) und Wasserstoff zerlegt. Die Gasmischung kann als (fossiler) Brennstoff eingesetzt werden oder als Synthesegas in verschiedenen Syntheseprozessen (siehe *Technologiefeld 4.3: Power-to-Liquids/Chemicals*) zum Einsatz kommen. Auch hier entstehen in der Regel Beiprodukte.

Beide chemischen Recyclingverfahren sind geeignet, um Kohlenstoffkreisläufe am Ende der Nutzung von Kunststoffprodukten zu schließen.

Während es für die Pyrolyse im Bereich der Abfallverwertung weltweit relativ viele Forschungs- und Entwicklungsvorhaben gibt, in der Anlagenkonzepte und Katalysatoren erforscht werden, gibt es wenig Projektbeispiele für die Gasifizierung von Kunststoffabfällen. Hier sind nur wenige Demonstrationsanlagen in Betrieb (Brems et al. 2013).

3 Relevanz öffentlicher Förderung

3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture

Als Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung der hocheffizienten Steam Cracker mit Carbon Capture wird je nach Szenarioumfeld eine Dauer bis in die 2020er oder sogar 2030er Jahre angesetzt (siehe Tab. I-1). Grund hierfür sind einerseits technische Entwicklungsbedarfe, andererseits Infrastrukturbedarfe sowie ökonomische Randbedingungen.

Tab. I-1 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Hocheffizienten Steam Crackern mit Carbon Capture

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 %	bis 2020 <input type="checkbox"/>	bis 2030 <input type="checkbox"/>	bis 2040 <input checked="" type="checkbox"/>	bis 2050 <input type="checkbox"/>	nach 2050 <input type="checkbox"/>
Szenarienbereich DE_95 %	bis 2020 <input type="checkbox"/>	bis 2030 <input checked="" type="checkbox"/>	bis 2040 <input type="checkbox"/>	bis 2050 <input type="checkbox"/>	nach 2050 <input type="checkbox"/>

Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

Als Vorlaufzeit bis zu einer Kommerzialisierung wird für Pyrolyse und Gasifizierung ein Zeitraum bis 2030 angesetzt (siehe Tab. I-2). Je nach eingesetzter Abfallsorte wird die Beurteilung dabei auf der Zeitachse unterschiedlich ausfallen. Eine Kommerzialisierung ist in hohem Maße vom Erdöl- bzw. Naphthapreis (bzw. auch Ethan in den USA) sowie den Emissionszertifikatekosten abhängig.

Tab. I-2 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Anlagen zum Chemischen Recycling von Kunststoffabfällen

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 %	bis 2020 <input type="checkbox"/>	bis 2030 <input checked="" type="checkbox"/>	bis 2040 <input type="checkbox"/>	bis 2050 <input type="checkbox"/>	nach 2050 <input type="checkbox"/>
Szenarienbereich DE_95 %	bis 2020 <input type="checkbox"/>	bis 2030 <input checked="" type="checkbox"/>	bis 2040 <input type="checkbox"/>	bis 2050 <input type="checkbox"/>	nach 2050 <input type="checkbox"/>

3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture

Tab. I-3 gibt die Einschätzung zur technologischen Reife wieder. Die einzelnen Komponenten (also katalytisches Cracken und Carbon Capture-Technologie mit post-combustion) werden jeweils mit dem Level 4 bewertet; eine integrierte Pilot-Anlage, die beide Komponenten vereint, gibt es jedoch noch nicht.

Tab. I-3 Aktuelles Entwicklungsstadium von Hocheffizienten Steam Crackern mit Carbon Capture

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	TF
Grundlagenforschung		
	TRL 1 – Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potentielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung		
	TRL 2 – Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input type="checkbox"/>
	TRL 4 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input checked="" type="checkbox"/>
Demonstration		
	TRL 5 – Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>
	TRL 6 – Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>
	TRL 7 – Prototypentest in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>
	TRL 8 – Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>
Kommerzialisierung		
	TRL 9 – Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input type="checkbox"/>
TF = Technologiefeld, TRL= Technology Readiness Level		

Die Wirkungsweise der einzelnen Komponenten der neuartigen Verfahren ist gut erforscht. Hier bestehen nur geringe technische Risiken, um solche Anlagen zur Anwendung zu bringen. Die wirtschaftlichen Risiken sind demgegenüber als höher einzuschätzen aufgrund der Rahmenbedingungen wie Energiepreise, CO₂-Zertifikatspreise sowie den Strombezugskosten. Auch die Erschließung von geeigneten CO₂-Senken stellt ein wirtschaftliches Risiko dar (Tab. I-4).

Tab. I-4 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Hocheffizienten Steam Crackern mit Carbon Capture

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

Abb. I-5 gibt eine Einschätzung des aktuellen Entwicklungsstandes für das rohstoffliche Recycling wieder. T1 steht dabei für die Pyrolyse, T2 für die Gasifizierung.

Tab. I-5 Aktuelles Entwicklungsstadium des Chemischen Recyclings von Kunststoffabfällen

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	TF	T1	T2
Grundlagenforschung				
	TRL 1 - Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potentielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung				
	TRL 2 - Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 - Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 4 - Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Demonstration				
	TRL 5 - Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 6 - Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 7 - Prototypentest in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 8 - Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kommerzialisierung				
	TRL 9 - Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TF = Technologiefeld, TRL= Technology Readiness Level

T1 = Technologie Pyrolyse, T2 = Technologie Gasifizierung

Obwohl bereits einige Demonstrationsanlagen weltweit in Betrieb sind, ist es bisher nicht gelungen, die energetische Verwertung von Kunststoffabfällen im kommerziellen Betrieb durch eine rohstoffliche Verwertung abzulösen.

Auch für den Bereich des rohstofflichen Recyclings besteht nur ein geringes technisches Entwicklungsrisiko, während die ökonomischen Risiken aufgrund der Konkurrenz durch Erdölprodukte und der insgesamt geringen Marktdynamik für Kunststoffvorprodukte in Europa als höher einzuschätzen sind (Tab. I-6).

Tab. I-6 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit dem Chemischen Recycling von Kunststoffabfällen

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes

4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Hocheffiziente Steam Cracker

Aus den im Projekt verwendeten Szenarien (siehe *Teilbericht 1*) können keine Angaben zu Marktpotenzialen für die hier betrachteten Technologiefelder entnommen werden, so dass diese abgeleitet wurden. Hierfür wurden zunächst bestehende Szenarien zur Entwicklung der Nachfrage nach Basischemikalien analysiert. Die entsprechenden (Re-)Investitionsbedarfe wurden für Deutschland und die Welt gemäß Annahmen zur technischen Lebensdauer der Anlagen aus der Literatur abgeleitet. Eigene Annahmen zum Marktanteil der innovativen Technologien an den jeweiligen Investitionen bilden die abschließende Grundlage für die Diffusionspfade.

Nur wenige Szenarien weisen die Nachfrage nach chemischen Produkten im Einzelnen aus. Insofern wird für die weltweite Nachfrage hier eine andere Quelle genutzt, und zwar die Technologie-Roadmap „Energy and GHG Reductions in the Chemical Industry via Catalytic Processes“ der IEA (IEA 2013). Dort wird ein stetig steigenden Bedarf bis 2050 ausgewiesen (siehe Abb. I-1), es ist jedoch einschränkend darauf hinzuweisen, dass die Werte nach 2030 lediglich extrapoliert wurden. Weiterhin ist zur Einordnung zu sagen, dass das Szenario eher bestehende Trends abbildet, die Dekarbonisierung des Energiesystems jedoch nicht zum Szenariorahmen gehört.

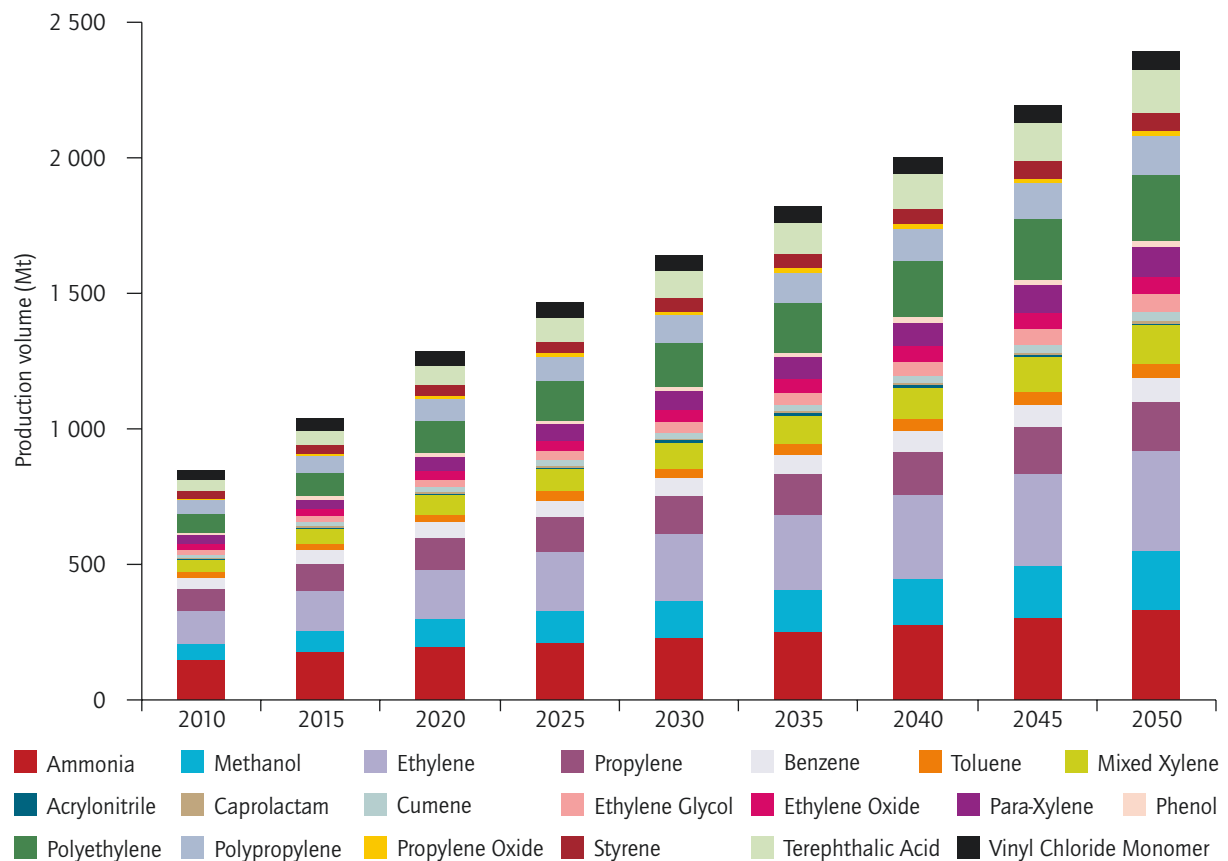


Abb. I-1 Szenario zur Entwicklung der Nachfrage nach Basischemikalien weltweit

Quelle: IEA - International Energy Agency (2013)

Für Deutschland weisen das Öko-Institut und Fraunhofer ISI (ÖI und FH ISI 2015) im Bericht „Klimaschutzszenario 2050“ ein Szenario zur Ethylenproduktion für die beiden Szenarien KS80 und KS95 aus (siehe Abb. I-2). Die anderen für Deutschland im Projekt ausgewerteten Energieszenarien weisen keine Daten hierzu aus. In der Energiereferenzprognose (Prognos AG et al. 2014) sind (für das Trendszenario) Pfade für die Bruttowertschöpfung auf Branchenebene angegeben. Da (ÖI und FH ISI 2015) die Bruttowertschöpfung auf Branchenebene dagegen nicht dokumentieren, ist hier kein qualitativer Abgleich zwischen den Szenarien möglich.

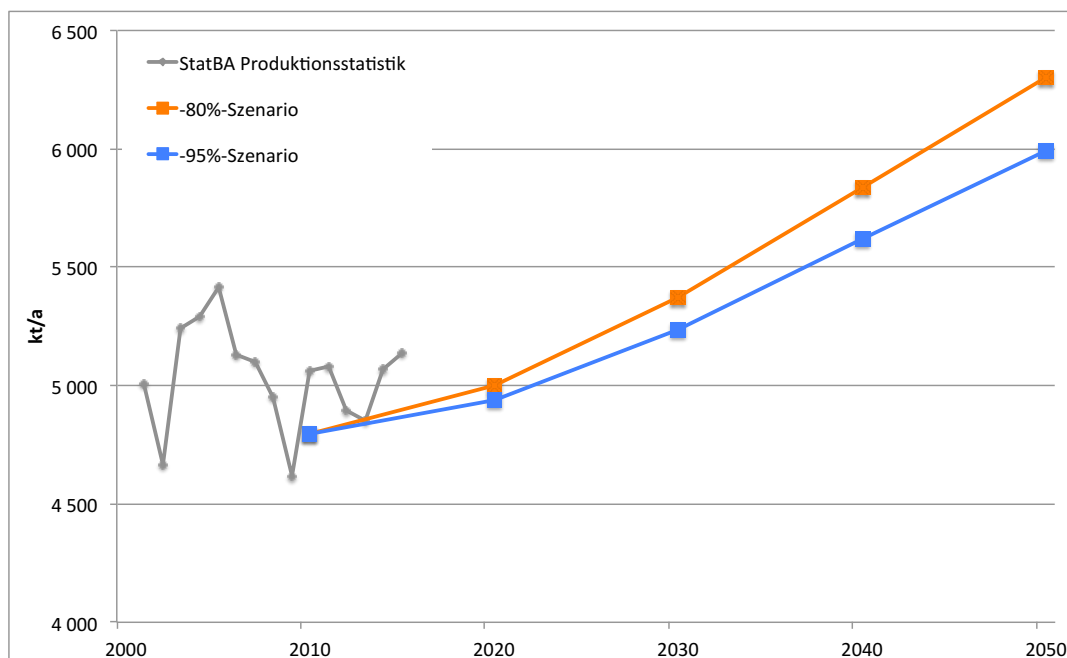


Abb. I-2 Produktionspfade für Ethen

Quelle: ÖI und FH ISI (2015), StatBA (2017), eigene Darstellung

Angeht die heutige Auslastung der Steam Cracker in Deutschland ließe sich das dargestellte Wachstum über eine leichte Kapazitätserhöhung im Rahmen von Retrofitmaßnahmen realisieren (siehe unten). Der Unterschied zwischen den beiden Produktionspfaden ist bezogen auf die Gesamtmenge gering.

Zur Einordnung ist jedoch zu sagen, dass der Branchenverband CEFIC für Europa insgesamt zu einer eher ungünstigeren Einschätzung kommt. Abb. I-3 weist die mittleren jährlichen Wachstumsraten (CAGR) für die laufende und kommende Dekade sowie den Zeitraum 2030-2050 für die vier Szenarien der CEFIC-Studie und die beiden Szenarien von Öko-Institut und Fraunhofer ISI aus³. Einschränkung hierzu ist zu sagen, dass CEFIC Umsätze (Nettowertschöpfung) ausweist, während Öko-Institut und Fraunhofer ISI Produktionsmengen (in Tonnen) verwenden. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass sich das Verhältnis von Bruttowertschöpfung zu Tonnage maßgeblich ändert, da es sich bei den hier untersuchten Produkten um homogene Produkte handelt, die hinsichtlich ihrer Produkteigenschaften nicht verbesserungsfähig sind. Da Ethen zudem als pars pro toto der Petrochemie angesehen werden kann, sei der Vergleich der CAGR zur groben Einordnung hier gestattet.

³ Für die beiden Szenarien von Öko-Institut und Fraunhofer ISI bezieht sich der CAGR auf die Jahresproduktionsmenge an Ethen in Tonnen.

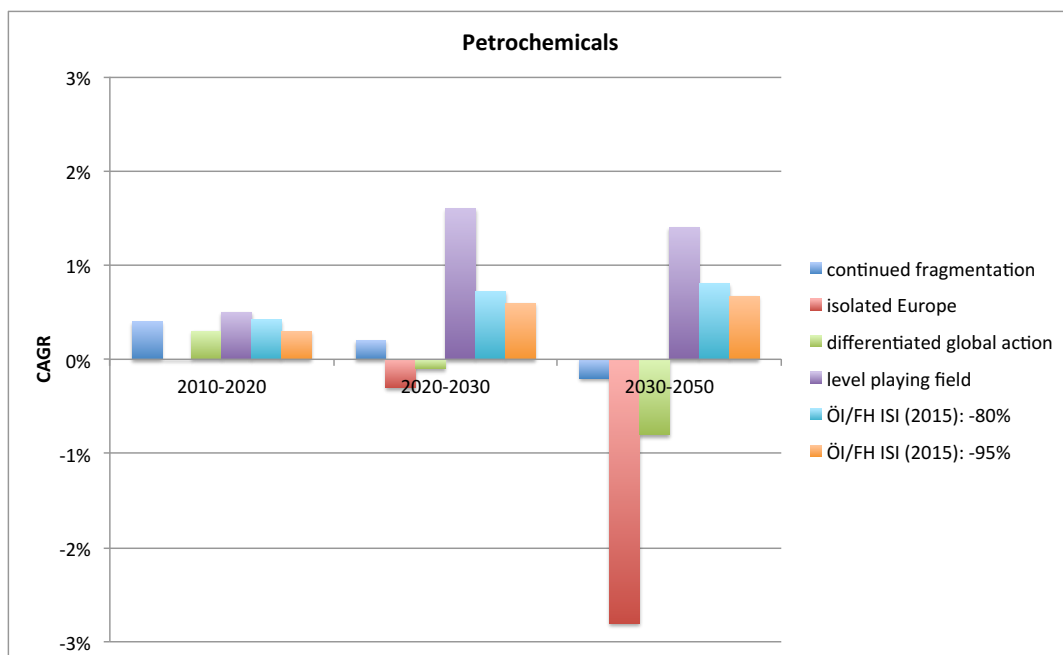


Abb. I-3 Entwicklung der Nettowertschöpfung bzw. der Tonnage im Bereich der Petrochemie

Quelle: Cefic (2013), ÖI und FH ISI (2015), eigene Darstellung

Nur das CEFIC-Szenario „level playing field“, das von einer kostenoptimalen Verteilung von „Klimaschutzlasten“ weltweit (!) ausgeht und Europa langfristig höhere Wachstumschancen einräumt, weist für die Petrochemie langfristig höhere Wachstumsraten aus als die Szenarien von Öko-Institut und Fraunhofer ISI. Letztere können somit als solche eingeordnet werden, in denen Deutschland auch langfristig Standort der energieintensiven Industrie bleibt und am weltweiten Produktionswachstum zumindest teilweise partizipiert.

Um zukünftige Marktumfänge für die hier zu untersuchende Technologie der hocheffizienten Steam Cracker abzubilden, wurde zunächst der bestehende Anlagenpark analysiert. In der Literatur geht man von 50 bis 60 Jahren technischer Lebensdauer von Steam Crackern aus (Fraunhofer ISI et al. 2011). Bezogen auf den heutigen Anlagenbestand bedeutet dies, dass in den 2020er bzw. 2030er Jahren der Großteil der Anlagen, der aus den 1970er Jahren stammt (siehe Tab. I-7), zur Erneuerung ansteht.

Tab. I-7 Anlagenbestand Steam Cracker in Deutschland (nach Baujahr geordnet)

Betreiber	Ort	Baujahr	Kapazität (kt Ethen/Jahr)
Raffinerie Heide	Heide	n.b.	100
Rheinland Raffinerie	Köln	1952	240
BASF	Ludwigshafen	1965	220
INEOS	Köln	1970	500
Basell Polyolefine	Münchsmünster	1970	320
RUHR OEL	Gelsenkirchen	1973	580
Dow	Böhlen	1975	565
INEOS	Köln	1978	830
Basell Polyolefine	Wesseling	1980	305
Rheinland Raffinerie	Köln	1980	260
BASF	Ludwigshafen	1980	400
RUHR OEL	Gelsenkirchen	1984	480
Basell Polyolefine	Wesseling	2001	738
OMV	Burghausen	2008	450

Quelle: WISEE Datenbank des Wuppertal Instituts

Diffusionspfade für die Technologie mit ausgewiesenen Marktanteilen bei Ersatzinvestitionen liegen nicht explizit ausformuliert vor. In der (Cefic 2013) Studie wurden jedoch Pfade abgeleitet, deren aggregierte Ergebnisse als Validierung für die im Folgenden abgeleiteten Annahmen dienen können.

Im Folgenden wird hypothetisch davon ausgegangen, dass Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture durch verstärkte F&E ab Mitte der 2020er-Jahre zur Verfügung stehen. Ob sie eingesetzt werden, hängt jedoch von der erwarteten Entwicklung über zukünftige Energieträger- und CO₂-Zertifikatspreise sowie von der Lösung der mit CCS in Zusammenhang stehenden offenen Fragen ab (Transport, geeignete Lagerstätten, Akzeptanz, ...). Des Weiteren könnte diese Technologie seitens der Genehmigungsbehörden als best-verfügbare Technologie (BAT) aufgefasst und entsprechend zum Einsatz bei Neu- und Ersatzinvestitionen vorgeschrieben werden. Von letzterem günstigen Fall geht das hier entworfene *Max-Szenario* (ab der 2030er-Dekade) aus. Dabei werden die während der 2020er-Jahre nicht auf Carbon Capture umgerüsteten Steam Cracker außerdem während der 2040er Jahre nachgerüstet.

Weltweit wird aufgrund des hohen Anteils des Kapazitätsaufbaus in Entwicklungs- und Schwellenländern eine niedrigere Diffusionsgeschwindigkeit angenommen. Die

während der 2030er-Jahre vorgenommenen Neuinvestitionen und Nachrüstungen ohne Carbon Capture werden im KS95 während der 2040er Jahre nachgerüstet.

Im Falle des KS80 wird dagegen angenommen, dass Carbon Capture erst während der 2040er Jahre bei Investitionen vorgeschrieben wird, weil die Minderungsziele bis 2050 voraussichtlich durch andere Maßnahmen kostengünstiger erreicht werden können. Weltweit erreicht die Technologie inkl. CO₂-Abscheidung hier nur Anteile von 10 % an den Gesamtinvestitionen.

Im ungünstigeren Fall (*Min-Szenario*) werden die Steam Cracker nach einer einmal erfolgten Nachrüstung (ohne CO₂-Abscheidung) nicht weiter verändert. In diesem Fall würde ein Großteil der Cracker bereits während der 2020er mit State-of-the-Art-Technologie erneuert.

Die in den Szenarien errechneten Gesamtmarktumfänge (d. h. der Umfang der Ersatz- und Neuinvestitionen in den gesamten Anlagenpark inkl. State-of-the-Art-Technologie) sowie die Marktpotenziale für die Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture sind in Tab. I-8 wiedergegeben.

Tab. I-8 Investitionsvolumen und Marktpotenzial der Technologie „Hocheffiziente SteamCracker mit Carbon Capture“ in Deutschland gegenüber dem gesamten Markt für Ersatzinvestitionen und Neubau von Steam Crackern (SC)

Szenario		Einheit	Zeitraum 2015 - 2020	Dekade 2020 - 2030	Dekade 2030 - 2040	Dekade 2040 - 2050
Min	Ersatzinvestition SC	1.000 t/a (Kapazität)	1.056	3.696	528	0
	Neubau SC	1.000 t/a (Kapazität)	0	0	0	0
	gesamter Marktumfang	1.000 t/a (Kapazität)	1.056	3.696	528	0
	Marktanteil Technologie	%	0	0	20	100
	Marktpotenzial Technologie	1.000 t/a (Kapazität)	0	0	105,6	0
	Marktpotenzial Technologie	Investition (Mio. EUR)	0	0	169	0
	Marktumfang kumuliert	1.000 t/a (Kapazität)	1.056	4.752	5.280	5.280
	Marktpotenzial Technologie kumuliert	1.000 t/a (Kapazität)	0	0	106	106
	Ersatzinvestition SC	1.000 t/a (Kapazität)	1.056	3.696	528	0
	Neubau SC	1.000 t/a (Kapazität)	0	0	0	0
	gesamter Marktumfang	1.000 t/a (Kapazität)	1.056	3.696	528	0
	Marktanteil Technologie	%	0	2	20	100
Max	Marktpotenzial Technologie	1.000 t/a (Kapazität)	0	74	106	0
	Marktpotenzial Technologie	Investition (Mio. EUR)	0	118	169	0
	Marktumfang kumuliert	1.000 t/a (Kapazität)	1.056	4.752	5.280	5.280
	Marktpotenzial Technologie kumuliert	1.000 t/a (Kapazität)	0	74	180	180

Min	Ersatzinvesti- tion	1.000 t/a (Kapazität)	1.056	3.696	528	0
	Neubau	1.000 t/a (Kapazität)	0	0	0	0
	gesamter Marktumfang	1.000 t/a (Kapazität)	1.056	3.696	528	0
	Marktanteil Technologie	%	0	20	50	100
	Marktpoten- zial Techno- logie	1.000 t/a (Kapazität)	0	739	264	0
	Marktpoten- zial Techno- logie	Investition (Mio. EUR)	0	1.180	421	0
	Marktumfang kumuliert	1.000 t/a (Kapazität)	1.056	4.752	5.280	5.280
	Marktpoten- zial Techno- logie kumu- liert	1.000 t/a (Kapazität)	0	739	1.003	1.003
	KS95					
Max	Ersatzinvesti- tion	1.000 t/a (Kapazität)	1.056	3.696	528	2.957
	Neubau	1.000 t/a (Kapazität)	0	0	0	0
	gesamter Marktumfang	1.000 t/a (Kapazität)	1.056	3.696	528	2.957
	Marktanteil Technologie	%	0	20	100	100
	Marktpoten- zial Techno- logie	1.000 t/a (Kapazität)	0	739	528	2.957
	Marktpoten- zial Techno- logie	Investition (Mio. EUR)	0	1.180	843	4.719
	Marktumfang kumuliert	1.000 t/a (Kapazität)	1.056	4.752	5.280	8.237
	Marktpoten- zial Techno- logie kumu- liert	1.000 t/a (Kapazität)	0	739	1.267	4.224

Quelle: eigene Berechnungen

Tab. I-9 Investitionsvolumen und Marktpotenzial der Technologie „Hocheffiziente SteamCracker mit Carbon Capture“ gegenüber dem gesamten Markt für Ersatzinvestitionen und Neubau von Steam Crackern (SC) weltweit

Szenario		Einheit	Zeitraum 2015 - 2020	Dekade 2020 - 2030	Dekade 2030 - 2040	Dekade 2040 - 2050
Min	Ersatzinvesti- tion SC	Mio. t/a (Kapazität)	15	31	14	33
	Neubau SC	Mio. t/a (Kapazität)	47	89	67	67
	gesamter Marktumfang	Mio. t/a (Kapazität)	63	120	80	100
	Marktanteil Technologie	%	0	1	5	10
	Marktpoten- zial Techno- logie	Mio. t/a (Kapazität)	0	1	4	10
	Marktpoten- zial Techno- logie	Investition (Mrd. EUR)	0	2	6	16
	Marktumfang kumuliert	Mio. t/a (Kapazität)	63	183	263	363
	Marktpoten- zial Techno- logie kumu- liert	Mio. t/a (Kapazität)	0	1	5	15
	Ersatzinvesti- tion SC	Mio. t/a (Kapazität)	15	31	14	57
	Neubau SC	Mio. t/a (Kapazität)	47	89	67	67
	gesamter Marktumfang	Mio. t/a (Kapazität)	63	120	80	124
	Marktanteil Technologie	%	0	1	5	10
Max	Marktpoten- zial Techno- logie	Mio. t/a (Kapazität)	0	1	4	12
	Marktpoten- zial Techno- logie	Investition (Mrd. EUR)	0	118	169	0
	Marktumfang kumuliert	Mio. t/a (Kapazität)	63	183	263	387
	Marktpoten- zial Techno- logie kumu- liert	Mio. t/a (Kapazität)	0	1	5	18

Min	Ersatzinvesti- tion SC	Mio. t/a (Kapazität)	15	31	14	33
	Neubau SC	Mio. t/a (Kapazität)	47	89	67	67
	gesamter Marktumfang	Mio. t/a (Kapazität)	63	120	80	100
	Marktanteil Technologie	%	0	10	70	100
	Marktpoten- zial Techno- logie	Mio. t/a (Kapazität)	0	12	56	100
	Marktpoten- zial Techno- logie	Investition (Mrd. EUR)	0	19	90	159
	Marktumfang kumuliert	Mio. t/a (Kapazität)	63	183	263	363
	Marktpoten- zial Techno- logie kumu- liert	Mio. t/a (Kapazität)	0	12	68	168
	KS95					
Max	Ersatzinvesti- tion SC	Mio. t/a (Kapazität)	15	31	14	57
	Neubau SC	Mio. t/a (Kapazität)	47	89	67	67
	gesamter Marktumfang	Mio. t/a (Kapazität)	63	120	80	124
	Marktanteil Technologie	%	0	10	70	100
	Marktpoten- zial Techno- logie	Mio. t/a (Kapazität)	0	12	56	124
	Marktpoten- zial Techno- logie	Investition (Mrd. EUR)	0	19	90	197
	Marktumfang kumuliert	Mio. t/a (Kapazität)	63	183	263	387
	Marktpoten- zial Techno- logie kumu- liert	Mio. t/a (Kapazität)	0	12	68	192

Quelle: eigene Berechnungen

Daraus abgeleitet sind die Investitionen in die neue Technologie (in monetären Größen). Zur Ableitung der spezifischen Investitionskosten vgl. die Ausführungen zum Kriterium *Kosteneffizienz* in Kapitel 4.4.

Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

Die Marktentwicklung für das chemische Recycling von Kunststoffabfällen ist abhängig von verschiedenen Faktoren:

- nachgefragte Menge an Kunststoffen
- Struktur der Kunststoffnachfrage
- Produktlebensdauer
- Abfallsammelrate (Mikro-Kunststoffe in Abwässern, marine litter etc.)
- Anteil mechanisches Recycling
- Anteil Monomer-Recycling
- Import-/Exportbilanz für Kunststoffabfälle
- Anteil der thermischen Verwertung
- Anteil der Deponierung

Die nachgefragte Kunststoffmenge bestimmt in Zusammenhang mit der Produktlebensdauer und der Sammelrate das tatsächlich „zur Verfügung stehende“ Abfallaufkommen. Die Potentiale zum mechanischen Recycling sowie zum Monomer-Recycling (als prinzipiell vorzuziehende, weil energetisch günstigere Optionen) hängen mit der Struktur des Kunststoffabfallaufkommens und der Import-/Exportbilanz zusammen. PET-Flaschen lassen sich beispielsweise recht gut recyceln (im Downcycling zu Gewebestrukturen), andere Kunststoffe weniger gut. Hierfür ungeeignete Kunststoffe können prinzipiell einer chemischen Verwertung zugeführt werden. Auch hierfür sind die unterschiedlichen Kunststoffarten unterschiedlich geeignet: Aufgrund seines Chloranteils bedarf PVC einer aufwändigeren Behandlung als die Polyolefine PE und PP. Das ist bei der Potenzialermittlung zu berücksichtigen.

Statt eines chemischen Recyclings werden die Kunststoffe heute in Deutschland in der Regel einer thermischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen zugeführt (Referenztechnologie). In einigen EU-Ländern werden Kunststoffabfälle teilweise auch noch deponiert, obwohl die EU-Gesetzgebung ein Verbot der Deponierung vorsieht.

Aufgrund des Fehlens geeigneter Potenzialstudien erfolgt eine stark vereinfachte Marktabschätzung. Die hierdurch ermittelten quantitativen Potenziale sind nur als indikativ anzusehen.

Für die Projektion der Kunststoffnachfrage wurde die Studie (Wilts et al. 2015) zugrunde gelegt, die in einem Referenzszenario im wesentlichen bekannte Trends bezogen auf die verschiedenen Einsatzzwecke von Kunststoffen anhand der jeweiligen historischen Umsatzentwicklung und der Entwicklung der Kunststoffintensitäten bis 2030 fortschreibt. Fraglich ist, ob eine solche Entwicklung konsistent mit einer Dekarbonisierung der Wirtschaft wäre. Deshalb wurde für das Szenario KS95 zusätzlich ein „Einsparszenario“ aus selbiger Studie berücksichtigt, das die Realisierung von Kunststoffeinsparungen durch „low hanging fruits“ unterstellt. Da hier nur der Kunststoffeinsatz und nicht die Nachfrage nach Neu-Kunststoffen aus der Petrochemie interessiert, wurden die beiden Einsparoptionen „Substitution durch erneuerba-

re Rohstoffe“ und „Einsatz von Kunststoff-Rezyklaten“⁴ zur Ableitung der Kunststoffnachfrage nicht berücksichtigt.

Die Berücksichtigung eines weiteren Szenarios, das weitergehende Einsparungen untersucht, ist hier nicht explizit notwendig, da der Minimal-Fall darin besteht, dass die Technologie-Entwicklung stagniert. Eine Nichtanwendung der Pyrolyse und/oder Gasifizierung von Kunststoffabfällen könnte folgende Gründe haben:

Szenario KS80:

Im Szenario KS80 (mit verbleibenden Emissions-„Budgets“) könnte den Abfallkraftwerken, also der thermischen Verwertung von Kunststoffen, eine gewisse Rolle zur Stromsystemstabilisierung zukommen. Die daraus folgenden fossilen CO₂-Emissionen in einer Größenordnung von 4,1 Mio. Tonnen CO₂ jährlich, die höher liegen als bei der alternativen Verstromung von Erdgas (2,8 Mio. t CO₂), würden dabei akzeptiert.

Szenario KS95:

Eine stark sinkende Kunststoffnachfrage speziell im Bereich der Verpackungen würde zu einem geringeren Anfall an Abfällen führen, wenn Kunststoff vermehrt in langlebigeren Produkten verwendet würde. Aufgrund der geringeren Mengen und höherer Margen beim Endkunden könnte sich ein spezifischer Markt für Biokunststoffe ergeben. Entsprechend wäre eine thermische Verwertung der Kunststoffe durch Verbrennung nicht mit direkten fossilen CO₂-Emissionen verbunden. Auch wenn das Feedstock-Recycling somit nicht zwingend notwendig für den Aufbau eines vollständig CO₂-neutralen Systems wäre, könnte sich eine solche zusätzliche CO₂-Senke als ressourcenschonend und ökonomisch gegenüber anderen Alternativen erweisen. Dies hängt jedoch von zahlreichen Randbedingungen ab (siehe Kapitel 4.10 zum Kriterium 12: Systemkompatibilität).

Auch wenn eine Nicht-Anwendung der Technologie im Rahmen der Szenario-Logik des KS95 nicht als die *wahrscheinlichste* Variante anzusehen ist, besteht darin doch auch für dieses Szenario die untere Grenze (Minimal-Fall) für die Potenzialabschätzung.

Da somit der Minimal-Fall ein Potenzial von Null aufweist, wird im Folgenden lediglich die Abschätzung zur Obergrenze dargestellt (Tab. I-10, Tab. I-11, Tab. I-12).

⁴ Mit dem Einsatz von „Kunststoffrezyklaten“ sind in der zitierten Studie nicht chemische, sondern mechanisch gewonnene Rezyklate gemeint.

Tab. I-10 Obergrenze des für Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen in Deutschland im Szenario KS80

kt/a	2020	2030	2040	2050
Abfallaufkommen	6.086	6.967	6.967	6.967
Nettoexport	1.408	895	179	0
Mechanisches Recycling	220	2.580	2.580	2.580
Thermisches Recycling	2.458	3.317	3.787	3.071
Feedstock-Recycling	0	175	421	1.316
Kapazität *)	7	19	59	186

*) Jahresverarbeitungskapazität der im Jahr installierten Anlagen (kt/a)

Tab. I-11 Obergrenze für Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen in Deutschland im Szenario KS95

kt/a	2020	2030	2040	2050
Abfallaufkommen	3.897	3.729	3.729	3.729
Nettoexport	901	479	96	0
Mechanisches Recycling	1.372	1.329	1.329	1.329
Thermisches Recycling	1.542	1.729	1.152	0
Feedstock-Recycling	81	192	1.152	2.400
Kapazität *)	7	56	112	128

*) Jahresverarbeitungskapazität der im Szenariojahr installierten Anlagen (kt/a)

Tab. I-12 Marktpotenziale für chemisches Recycling von Kunststoffabfällen in Deutschland

kt/a	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2015 - 2020	0 – 33	0 – 33
2021 - 2030	0 – 142	0 – 159
2031 - 2040	0 – 246	0 – 960
2041 - 2050	0 – 928	0 – 1.281

Quelle: eigene Berechnungen

Für eine Bewertung der weltweiten Potenziale zum rohstofflichen Recycling von Kunststoffabfällen lagen keine Szenariodaten vor. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Potenziale auch weltweit sehr hoch sind.

4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionszielen

Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture

Der Beitrag zu THG-Minderungszielen wurde unter Bezugnahme auf die in Kriterium 3 ermittelten Marktpotenziale ermittelt. Der mögliche Beitrag zur Erreichung von Klimaschutzzielen durch *Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture* liegt je nach Szenario im Bereich einer Vermeidung von 90.000 Tonnen bis maximal 3,8 Mio. Tonnen CO₂ jährlich (siehe Tab. I-13). Bei der Berechnung wurde als Referenz der heutige Bestand berücksichtigt (entsprechend Cefic 2013; Ren 2009). Es ist jedoch zu betonen, dass bereits ein Investment in State-of-the-Art-Technologie einen deutlichen Minderungsbeitrag gegenüber dem heutigen Anlagenbestand bedeuten würde.

Tab. I-13 Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

Mio. t CO ₂ -äq./a	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	-	-
2030	0 – 0,06	0,6
2040	0,09 – 0,2	0,9 – 1,1
2050	0,09 – 0,2	0,9 – 3,8

Quelle: eigene Berechnungen

Die Anwendung von Carbon Capture hat einen erhöhten Strombedarf zu Folge, der bei der Bewertung berücksichtigt wurde.⁵ Für die CO₂-Abtrennung im Steam Cracker wurde eine Abtrennungsrate von 90 % angenommen. Es wurde darüber hinaus angenommen, dass weitere 5 % CO₂ auf dem Transportweg verloren gehen.

Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

Im Rahmen der Bewertung der Minderungspotenziale der Technologie wird hier ausschließlich die Gasifizierung betrachtet, da die Bewertung der Vielzahl an Produkten einer Pyrolyse relativ komplex ist, d. h. einer Vielzahl von Annahmen bedarf, um die Gutschriften zu bestimmen.⁶

⁵ Für die Abscheidung wurde ein spezifischer Strombedarf von 300 kWh pro Tonne abgeschiedenes CO₂ angesetzt, für die Kompression auf 110 bar zusätzlich 129 kWh/t. Die angesetzten Emissionsfaktoren für Strom sind Tab. II-13 zu entnehmen.

⁶ Auch für die Bewertung der Beiprodukte müssen szenariospezifische Referenzprodukte festgelegt werden.

Als Referenz wird eine rein thermische Verwertung in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) zur Wärmeerzeugung angesetzt und eine Gutschrift für die erzeugte Wärme entsprechend einer Erzeugung in einem Erdgas-Dampfkessel gegeben. Das Synthesegas, das im Fall der Gasifizierung anfällt, muss hier separat erzeugt werden, wofür Dampfreformierung von Erdgas angenommen wird.

Auch weitere alternative (heute durchaus übliche) thermische Verwendungen wie die Verwertung in einer KWK-Anlage, einer Beifeuerung im Kohlekraftwerk oder der Einsatz in einem Drehrohrofen zur Zementproduktion wären im Prinzip möglich, werden aber nicht betrachtet.

Es werden somit folgende zwei Fälle verglichen:

	Fall 1 Gasifizierung	Fall 2 Referenz
Herstellung Synthesegas (CO / H ₂)	Gasifizierung von Kunststoffabfällen	Dampfreformierung von Erdgas
Wärmebereitstellung	Erdgas-Dampfkessel	MVA (ohne KWK)

Die grauen Felder zeigen an, wo die Reststoffverwertung stattfindet, die weißen zeigen die jeweilige andere Energiedienstleistung, die dann mit Erdgas als Referenzenergieträger erbracht werden muss.

Eine Bewertung der Synthesegasproduktion gegenüber einer Referenztechnologie wird nicht vorgenommen. Wenn auch im Referenzpfad ein Synthesegas aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff erzeugt wird, so entstehen in beiden Routen keine prozessbedingten Emissionen, da der Kohlenstoff vollständig im Produkt gebunden bleibt. Letztlich bestimmt dann das benötigte CO/H₂-Verhältnis downstream die Bewertung. Die energiebedingten Emissionen der Synthesegasherstellung sind gegenüber den Emissionen der Wärmeerzeugung vernachlässigbar.

Tab. I-14 zeigt die erzielbaren Treibhausgasminderungen gegenüber dem Referenzfall auf. Die Spannbreite ergibt sich durch die Spannbreiten bei den ermittelten Potenzialen.

Tab. I-14 Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Gasifizierung von Kunststoffabfällen in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

Mio. t CO ₂ -äq./a	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	-	0 – 0,08
2030	0 – 0,2	0 – 0,2
2040	0 – 0,4	0 – 1,2
2050	0 – 1,3	0 – 2,4

Quelle: eigene Berechnungen

Die Spannweite der Einsparungen reicht von 0 bis 2,4 Millionen Tonnen CO₂ im Jahr 2050 im KS95. Bezogen auf das Ambitionsniveau in diesem Szenario (CO₂-Budget in

Höhe von etwa 50 Mio. t/a im Jahr 2050) wäre auch ein Beitrag in dieser Größenordnung signifikant.

4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz

Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture

Die hocheffizienten Steam Cracker werden wiederum gegenüber der Performance des heutigen Bestandes verglichen. Die zusätzliche Effizienzverbesserung durch die neue Technologie wird nur teilweise durch den erhöhten Energieeinsatz für Carbon Capture aufgezehrt. Die dadurch erreichbaren Minderungsleistungen entsprechend der Durchdringung des Anlagenbestands zeigt Tab. I-15.

Tab. I-15 Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch Hocheffiziente Steam Crack-
ermit Carbon Capture in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

PJ/a	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	-	-
2030	0 – 1,1	10,1
2040	1,5 – 2,6	14,5 – 18,3
2050	1,5 – 2,6	14,5 – 61,0

Quelle: eigene Berechnungen

Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

Die Primärenergieeinsparung der Gasifizierung (Tab. I-16) ist in erster Linie auf die unterschiedliche Effizienz bei der Bereitstellung von Wärme durch Kunststoffverbrennung in der MVA gegenüber einer Wärmebereitstellung durch Erdgas zurückzuführen.

Tab. I-16 Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch Gasifizierung von Kunststoff-
abfällen in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

PJ/a	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	-	0 – 0,5
2030	0 – 1	0 – 1
2040	0 – 3	0 – 7
2050	0 – 8	0 – 14

Quelle: eigene Berechnungen

Im Referenzfall der thermischen Verwertung der Reststoffe in der MVA wird ein Wirkungsgrad von 82 % angesetzt⁷, während bei der Bereitstellung von Dampf durch Erdgas im besten Fall 95 % angesetzt werden können. Würde als Referenz eine dezentrale Wärmeerzeugung mit Erdgasbrennwertkessel angesetzt, könnte der Einsparbetrag noch höher ausfallen.

4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz

Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture

Eine eingehende Bewertung der Kosteneffizienz kann an dieser Stelle aufgrund der fehlenden Kostenparameter für die neuartigen Komponenten nicht erfolgen, die Diskussion beschränkt sich somit auf qualitative Gesichtspunkte.

Referenztechnologie

Die Ofentechnologie eines Steam Crackers ist relativ aufwändig, weil die Reaktionsbedingungen sehr scharf sind (hohe Temperatur und hoher Druck). Zusätzliche Aufwendungen sind investitionsseitig für die Trenn-Technologie notwendig, da das konventionelle Steam Cracking von Naphtha zu einem relativ breiten Produktmix führt.

Für eine Anlage mit einer Erzeugungskapazität von einer Million Tonnen Ethylen jährlich nach heutigem State-of-the-Art sind 1,4 Mrd. EUR₂₀₁₅ anzusetzen (siehe auch Kriterium 10 in Kapitel 4.8).

Verbesserte Materialien zur Rohrauskleidung

Eine Verbesserung der Rohrauskleidung in der Pyrolysesektion hätte einen höheren Materialaufwand zur Folge. Durch die Erhöhung der Produktausbeute sinkt jedoch der relative Aufwand. Eine Verbesserung der Selektivität führt darüber hinaus zu geringerem Trennaufwand.

Katalytisches Cracken

Für das katalytische Cracken gelten im Prinzip die gleichen Argumente, zusätzlich muss hier der erhöhte Aufwand an Hilfsmitteln (Katalysator) in Rechnung gestellt werden, Einsparungen ergeben sich in der Ofentechnologie, da mildere Reaktionsbedingungen herrschen.

Carbon Capture

Für Carbon Capture kann ein zusätzlicher Investitionsaufwand von 218 EUR pro Tonne jährlich abgeschiedenes CO₂ angesetzt werden (Cefic 2013).⁸

Bei einer Anlagengröße von 1 Mio. Tonnen Jahreskapazität Ethylen beträgt der zusätzliche Aufwand einer hocheffizienten Anlage mit Carbon Capture gegenüber einer hocheffizienten Anlage ohne Carbon Capture somit 196 Mio. EUR₂₀₁₅.

⁷ Gemäß Prozess-Datensatz *Verbrennung Kunststoff in MVA incl. Gutschrift* in der Datenbank ÖKO-BAUDAT des BMUB.

⁸ Die Investitionssumme bezieht sich auf eine Abscheidung von 3 Mio. Tonnen CO₂ jährlich. Angegeben sind 200 EUR/(t*a), der Wert wurde mit dem Deflator für das BIP der EU-28 deflationiert und entsprechend für EUR₂₀₁₅ angegeben.

Zusätzliche Betriebskosten sind für zusätzlichen Brennstoffbedarf, Strombedarf sowie Hilfsmittel (z. B. Amine) anzusetzen. Die (betriebswirtschaftliche) Kosteneffizienz ist dann im Hinblick auf die eingesparten Zertifikatekosten zu beurteilen.

Weitere Kosten können für die Infrastruktur des CO₂-Transports bzw. ggf. auch zur CO₂-Einlagerung entstehen (siehe hierzu *Technologiefeld 2.3: CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS)*).

Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

Vergleichbare Kostendaten für die verschiedenen Prozesse im europäischen Umfeld sind inzwischen relativ alt und möglicherweise teilweise überholt. Die Untersuchung von (Tukker et al. 1999) gibt für verschiedene Prozesse unterschiedlich hohe Defizite („gate fee“) bis zur Erreichung einer Kostendeckung an. Sie sind in Tab. I-17 wiedergegeben.

Tab. I-17 Vergleich zum Kostendeckungsgrad unterschiedlicher Verfahren des rohstofflichen Recyclings im Vergleich zur thermischen Verwertung in einer Müllverbrennungsanlage (MVA)

Prozess	Verfahren	Input	Output ^{*)}	„Gate fee“ ^{**) (EUR/t)}
BASF	Pyrolyse	Plastik-Mix	Alkene, Alkane, Chlorwasserstoff	250
SVZ	Gasifizierung	Plastik-Mix	Syngas, Methanol	150?
Linde	Gasifizierung	PVC-reicher Plastik-Mix	Syngas, Chlorwasserstoff	200
Texaco	Gasifizierung	Plastik-Mix	Syngas, Ammoniumchlorid	100
MVA	Thermische Verwertung	Plastik-Mix	Fernwärme / Strom	100-150
Klinkeröfen	Thermische Verwertung	Plastik-Mix	Prozesswärme	< 100?

^{*)} Syngas steht jeweils für einen Gasmix aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid

^{**) Euro-Angaben nicht inflationsbereinigt. Fragezeichen deuten auf Unsicherheiten und sind auch in der Original-Quelle angegeben.}

Quelle: Tukker et al. (1999), eigene Zusammenstellung

Die Übersicht zeigt auf, dass kein Verfahren (inkl. der thermischen Verwertung) kostendeckend ist, so dass die Verwertung also „entlohnt“ werden muss.

Interessanterweise wurde die thermische Verwertung in der MVA damals als nicht eindeutig kostengünstigste Option beurteilt, allerdings hat sie sich mit Einführung des Verbots der Deponierung innerhalb der EU durchgesetzt. Daneben spielt heute auch die Verbrennung in den Drehrohröfen der Zementindustrie eine bedeutende Rolle, während der Einsatz als Reduktionsmittel im Hochofen nur eine Nische darstellt. Auch der Export von Kunststoffabfällen zu Recyclingzwecken hat stark zugenommen. Diese werden in den Zielländern mechanisch rezykliert oder thermisch verwertet (Lindner und Hoffmann 2015).

Die Kostenstrukturen haben sich seit 1999 nicht unbedingt zum besseren für die rohstoffliche Verwertung gewendet, weil die chemischen Plattformprodukte trotz stark steigender Nachfrage in Ostasien durch den niedrigen Ölpreis, niedrigen Dollarkurs und die derzeit reichhaltige Verfügbarkeit von Ethan in den USA zu relativ geringen Preisen gehandelt werden.⁹

Durch die relativ stabilen Energieträgerpreise hat sich allerdings auch die Erlösseite beim Referenzprozess der thermischen Verwertung nicht stark verbessert.

4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung

Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture

Der Markt für Steam Cracker weltweit teilt sich auf fünf große Unternehmen auf:

- KBR
- Technip
- Linde
- Shaw, Stone & Webster
- Lummus

Die derzeit angebotenen Technologien unterscheiden sich im Detail vor allem im Bereich der Gastrennung, der Grad der Energieeffizienz ist aber ähnlich (vgl. Ren 2009).

Da Linde (mit Produktionsstandorten in Deutschland) auch im Bereich CO₂-Abtrennung und CO₂-Aufbereitung im Aufbau von Pilotanlagen bereits aktiv ist, wird davon ausgegangen, dass die Ausgangslage für eine zukünftige Technologieführerschaft in Deutschland für integrierte Anlagen sehr gut ist.

Aufgrund der insgesamt sehr guten Wettbewerbsposition deutscher Anlagenbauer kann zudem auf eine ausreichende Forschungsinfrastruktur im Inland geschlossen werden.

Die Linde AG fusionierte kürzlich mit dem US-Unternehmen Praxair. Das neue Unternehmen wird Presseberichten zufolge seinen Sitz nicht in Deutschland haben, es ist jedoch davon auszugehen, dass der Anlagenbau mit den bestehenden Produktionsstandorten in Deutschland bleiben wird. Konkret geht es hier um den Hauptsitz der *Linde Engineering* mit Sitz in Pullach, das Linde-Werk Schalchen in Tacherting sowie Selas-Linde in Pullach. Ein Teil des Anlagenbaus der Tochter Selas-Linde ist jedoch in den USA verortet.

Aktuelle Marktanteile der Linde AG am weltweiten Markt für Steam Cracker konnten nicht ermittelt werden; eine Quelle gibt 15 Mio. Tonnen Jahreskapazität an, die weltweit im Jahr 2005 mit Linde-Technologie betrieben wurden. Bezogen auf den damaligen Anlagenbestand von etwa 120 Mio. Tonnen entspricht das einem Weltmarktanteil von 12,5 %. Bei den jüngsten Bauprojekten in Deutschland (nach 1990) erreichte Linde bezogen auf die Steam Cracker-Jahreskapazität einen Marktanteil von 62 %.

⁹

Bis zum Beginn der Wirtschafts- und Finanzkrise wäre die Entwicklung jedoch anders zu beurteilen.

Tab. I-18 und Tab. I-19 zeigen das demnach erzielbare Marktvolumen für deutsche Unternehmen auf. Dabei wurde unterstellt, dass mittelfristig (und vorübergehend) durch Technologieführerschaft zumindest im Segment der Technologie „hocheffiziente Steam Cracker mit CC“ höhere Marktanteile realisiert werden können, dass die Konkurrenten bei insgesamt höheren Marktvolumina für die Technologie in den 2030er und 2040er Jahren jedoch wieder aufholen.

**Tab. I-18 Anteile deutscher Unternehmen am Markt für Hocheffiziente Steam Cracker mit-
Carbon Capture in Deutschland**

Szenario		Einheit	Zeitraum 2015 - 2020	Dekade 2020 - 2030	Dekade 2030 - 2040	Dekade 2040 - 2050
Min	Marktpoten- zial Techno- logie	1.000 t/a (Kapazität)	0	0	106	0
	Anteil deut- scher Unter- nehmen	%	0	0	100	62
	Inländisches Produktions- volumen	1.000 t/a (Kapazität)	0	0	106	0
KS80	Marktpoten- zial Techno- logie	1.000 t/a (Kapazität)	0	74	105,6	0
	Anteil deut- scher Unter- nehmen	%	0	100	62	62
	Inländisches Produktions- volumen	1.000 t/a (Kapazität)	0	74	65	0
Min	Marktpoten- zial Techno- logie	1.000 t/a (Kapazität)	0	739	264	0
	Anteil deut- scher Unter- nehmen	%	0	100	62	62
	Inländisches Produkti- onsvolumen	1.000 t/a (Kapazität)	0	739	164	0
KS95	Marktpoten- zial Techno- logie	1.000 t/a (Kapazität)	0	739	528	2957
	Anteil deut- scher Unter- nehmen	%	0	100	62	62
	Inländisches Produktions- volumen	1.000 t/a (Kapazität)	0	739	327	1833

Quelle: eigene Berechnungen

Tab. I-19 Anteile deutscher Unternehmen am Markt für Hocheffiziente Steam Cracker mit-Carbon Capture weltweit

Szenario		Einheit	Zeitraum 2015 - 2020	Dekade 2020 - 2030	Dekade 2030 - 2040	Dekade 2040 - 2050
Min	Marktpoten- zial Techno- logie	Mio. t/a (Kapazität)	0	1	4	10
	Anteil deut- scher Unter- nehmen	%	13	100	25	15
	Inländisches Produktions- volumen	Mio. t/a (Kapazität)	0	1	1	1
KS80	Marktpoten- zial Techno- logie	Mio. t/a (Kapazität)	0	1	4	12
	Anteil deut- scher Unter- nehmen	%	13	100	25	15
	Inländisches Produktions- volumen	Mio. t/a (Kapazität)	0	1	1	2
Min	Marktpoten- zial Techno- logie	Mio. t/a (Kapazität)	0	12	56	100
	Anteil deut- scher Unter- nehmen	%	13	50	20	15
	Inländisches Produkti- onsvolumen	Mio. t/a (Kapazität)	0	6	11	15
KS95	Marktpoten- zial Techno- logie	Mio. t/a (Kapazität)	0	12	56	124
	Anteil deut- scher Unter- nehmen	%	13	50	20	15
	Inländisches Produktions- volumen	Mio. t/a (Kapazität)	0	6	11	19

Quelle: eigene Berechnungen

Abschließend werden Hinweise auf die tatsächlichen Wertschöpfungseffekte gegeben. Für die Wertschöpfung dieser Technologie liegen keine gesonderten Quellen für Deutschland vor. Die direkten Wertschöpfungspotenziale liegen zum einen im Bau der Anlagenkomponenten, zum Anderen im Bereich der Baubranche. Für letztere

sind Auswirkungen auf die deutsche Wertschöpfung insbesondere bei Investitionen in Deutschland zu erwarten.

In der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung ist die (Brutto-)Wertschöpfung definiert als die Differenz zwischen Bruttoproduktionswert (entspricht dem Umsatz) und den bezogenen Vorleistungen. Gemäß Input-Output-Rechnung des Statistischen Bundesamtes realisierte der deutsche Maschinenbau 2012 einen Wertschöpfungsanteil von 27 % bezogen auf die Herstellkosten (StatBA 2016) (Wertschöpfung nach Herstellpreisen). Darüber hinaus bezieht der Maschinenbau in etwa zwei Drittel seiner Vorleistungen aus dem Inland (ebd.). Bei einer Berechnung der Wertschöpfungseffekte wären diese Vorleistungen zusätzlich hinsichtlich ihrer indirekten Wertschöpfung in Deutschland zu berücksichtigen. Aufgrund der unvollständigen Datenlage erfolgt hierzu keine gesonderte Abschätzung.

Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

Eine Abschätzung der Wertschöpfungseffekte eines verstärkten rohstofflichen Recyclings ist im Rahmen der Untersuchung nicht möglich.

Auch wenn es derzeit nur wenige Projekte in Deutschland gibt, so gibt es dennoch deutsche Anlagenbauer, die entsprechende Recycling-Technologien anbieten. Ein Beispiel hierfür ist die BP-Tochter VTA, die bisher in kleinem Umfang Pyrolyse-Anlagen gebaut hat.

Ein *Entwickler* im Bereich Pyrolyse ist die NILL-TECH GmbH, die den sogenannten Syntrol®-Prozess entwickelt hat – nach eigenen Angaben bis zur Marktreife. Der Bau einer entsprechenden Anlage im Demonstrationsmaßstab (mit Jahreskapazität von 26 kt), finanziert durch einen Venture Capital Fonds, war gemäß Presseberichten aus dem Jahr 2014 in Mannheim geplant, der gegenwärtige Status des Projekts konnte jedoch nicht geklärt werden.

Abgesehen vom Anlagenbau könnte auch der Anlagenbetrieb Wertschöpfungseffekte erbringen, vor allem für den Fall, wenn durch das inländische rohstoffliche Recycling die Abfallexporte Deutschlands sinken würden.

4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich

Angaben zu F&E-Budgets der Bundesregierung liegen auf der notwendigen Aggregationsstufe in der verwendeten Datenbank der IEA¹⁰ nicht vor. Die tiefstmögliche Aggregation wird dort durch die Punkte „Industrial techniques and processes“ sowie „Industrial equipment and systems“ gebildet. Die CO₂-Trennung wird zwar separat aufgeführt, ist jedoch explizit Teil der Analysen zu den *Technologiefeldern 2.3: CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS) und 2.4: CO₂-Nutzung*. Insofern sind zu den hier analysierten Prozessen keine belastbaren Aussagen möglich.

¹⁰

<http://wds.iea.org/WDS/Common/Login/login.aspx>

Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture

Insgesamt kann der deutsche Anlagenbau in diesem Bereich generell als wettbewerbsfähig angesehen werden, da Linde am weltweiten Markt erfolgreich partizipiert.

Tab. I-20 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich Hocheffizienten-Stream Crackern mit Carbon Capture

Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieses Technologiefeldes weltweit?

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Technologieführerschaft | <input checked="" type="checkbox"/> wettbewerbsfähig |
| <input type="checkbox"/> nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig | <input type="checkbox"/> abgeschlagen |

Um die Veröffentlichungsintensität in Deutschland im internationalen Vergleich einzuschätzen (Teilkriterium F&E-Outputs), wurde eine Scopus-Recherche durchgeführt.

Die Suchbegriffe lauteten:

("Steam Cracker" OR "Steam Cracking") AND ("catalytic cracking" OR "gas turbine" OR ("coating" AND "ceramic"))¹¹

Die Auswertung ergab eine vergleichsweise geringe Präsenz von neuartigen Verfahren des Steam Cracking in wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Insgesamt ergab die Suche etwa 200 Treffer, wovon etwa 170 in der Zeit ab dem Jahr 2000 veröffentlicht worden sind. Der Anteil von Veröffentlichungen mit deutscher Beteiligung betrug im Zeitraum 2000 bis 2016 knapp 6 %, was in etwa auch dem Anteil der Artikel mit deutscher Beteiligung an *allen* englischsprachigen Artikeln entspricht.

¹¹

Es sei darauf hingewiesen, dass trotz der stark spezifizierten Suchbegriffe Fehlsortierungen nicht ausgeschlossen sind. So ist es durchaus möglich, dass ein Artikel sowohl „Steam Cracker“ als auch „fluidized bed catalytic crackers“ (FCC) behandelt. Bei letzterer Technologie handelt es sich um ein katalytisches Crack-Verfahren im Raffineriebereich, dessen Hauptzielprodukt Benzin ist (Olefine, vor allem Propen, sind jedoch auch Teil der Produktpalette).

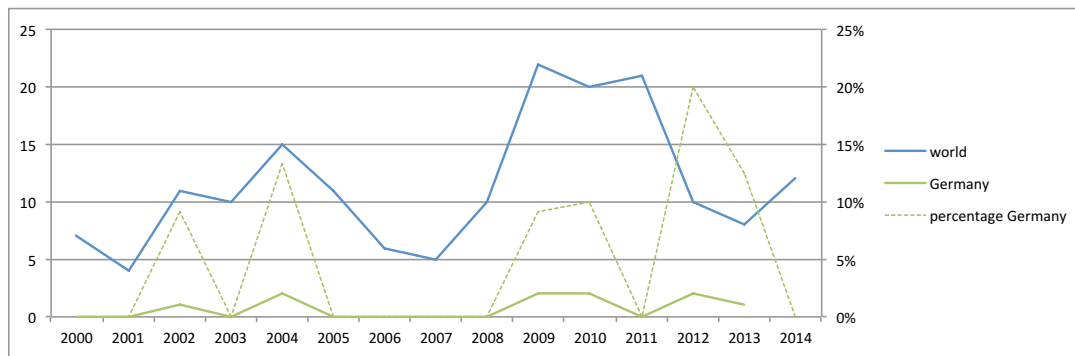


Abb. I-4 In Scopus verzeichnete Veröffentlichungen zu ausgewählten Suchbegriffen im Technologiefeld Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture

Es ist zu betonen, dass Carbon Capture nicht in die Analyse mit einbezogen worden ist. Hinsichtlich der dahingehenden Forschung ist auf *Technologiefeld 2.3: CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS)* zu verweisen.

Eine *Patentanalyse* hätte aufgrund der geringen Homogenität im Technologiefeld einen unverhältnismäßig hohen Aufwand bedeutet. Auf sie wurde deshalb verzichtet.

Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

Die Einschätzung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie ist in diesem Feld schwierig, da es noch keinen Markt hierzu gibt. Insgesamt ist der deutsche Anlagenbau jedoch in anderen Kontexten (Petrochemie) im Bereich der Pyrolyse und Gasifizierung erfolgreich am Weltmarkt tätig, so dass insgesamt von einer guten Ausgangsposition ausgegangen werden kann.

Tab. I-21 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich Chemischen Recycling von Kunststoffabfällen

Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieses Technologiefeldes weltweit?

- ☐ Technologieführerschaft
 ☒ wettbewerbsfähig
☐ nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig
 ☐ abgeschlagen

Um die Veröffentlichungsintensität in Deutschland im internationalen Vergleich einzuschätzen (Teilkriterium F&E-Outputs), wurde eine Scopus-Recherche durchgeführt.

Die Suchbegriffe lauteten:

("plastic solid waste" OR "plastic waste" OR "psw") AND ("gasification" OR "pyrolysis" OR "syngas" OR "chemical recycling")

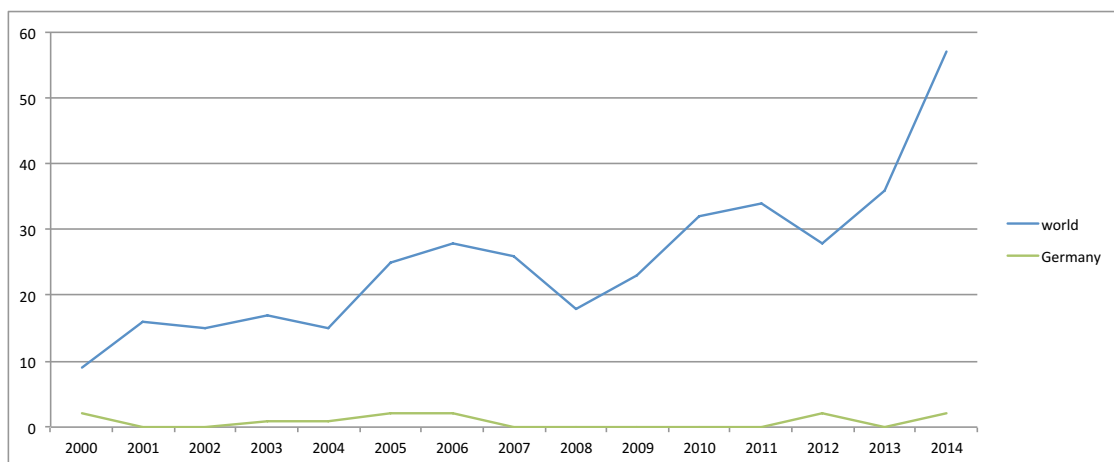


Abb. I-5 In Scopus verzeichnete Veröffentlichungen zu ausgewählten Suchbegriffen im Bereich Rohstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen

Der Trend der Zahl der Veröffentlichungen weltweit ist sehr klar ansteigend und hat nach 2012 noch einmal deutlich an Fahrt gewonnen.

Gleichzeitig muss jedoch konstatiert werden, dass die deutsche Forschungslandschaft an diesem Zuwachs nicht partizipiert, sondern ihre Führungsrolle abgegeben hat. Bis zur Mitte der 1990er Jahre waren deutsche Forscher an 27 % aller Veröffentlichungen weltweit zu diesem Thema beteiligt, auf die Veröffentlichungen seit 2000 bezogen liegt der Anteil nur noch bei etwa 3 % und ist damit unterdurchschnittlich (in Bezug auf alle englischsprachigen Veröffentlichungen liegt der Anteil derer mit deutscher Beteiligung bei 6 %).

An der Universität Hamburg wurde die Pyrolyse maßgeblich weiterentwickelt. An der Entwicklung des BP-Demonstrators in Grangemouth war die Universität beteiligt. Bis 2006 wurden dort einige einschlägige Dissertationen veröffentlicht. Mit der Emeritierung des ehemaligen Direktors des *Instituts für technische und makromolekulare Chemie* Prof. Dr. Walter Kaminsky hat das Thema dort jedoch deutlich an Bedeutung verloren. Derzeit gibt es keine Masterarbeiten oder Dissertationen zur Pyrolyse.

Derzeit werden Pyrolyse und Gasifizierung an der Bergakademie Freiberg (Abteilung Thermochemische Konversion) erforscht, der gegenwärtige Fokus liegt aber im Bereich der stofflichen Verwertung von Kohle und Biomasse.

4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz

Eine gesonderte Literaturrecherche zum Thema gesellschaftliche Akzeptanz erscheint aufgrund der Inhomogenität des Technologiefeldes nicht verhältnismäßig. Insofern sei auf folgende Querbezüge zu anderen Technologiefeldern verwiesen.

Steam Cracker mit CC: Technologiefeld 2.3: CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS)

Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen: Technologiefeld 1.1: Bioenergie

Per Analogieschluss können Erkenntnisse gegebenenfalls auf die hier besprochenen Technologien übertragen werden.

4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture

Die Planungs- und Bauzeitenangaben in Tab. I-22 beziehen sich auf ein aktuelles Projekt von Shell in den USA und dürften in Europa ähnlich sein.

Tab. I-22 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Technologiefeldes Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture

Variable	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Planungszeit	Monate	18				
Bauzeit	Monate	36				
Heute übliche ökonomische Nutzungsdauer	Jahre	50				
Spezifische Investition	Mrd. € ₂₀₁₅ /Anlage	1,4				

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis unterschiedlicher Quellen (siehe Fußnoten 12 und 13)

Die unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit hinsichtlich eines Investments in Steam Cracker ist sehr hoch: Die für Europa realistische Größe von 1 Mio. Jahrestonnen Kapazität („world-scale“) bei einem Neuinvest bedeutet einen Kapitalbedarf in Höhe von etwa 1,4 Mrd. EUR (ohne Finanzierungskosten) pro Einheit.¹² Die Investition ist somit nur wenig skalierbar.

Die Investitionsangaben beziehen sich auf Neu-Investitionen und sind somit nur bedingt übertragbar auf die in Europa anstehenden Retrofits. Zum anderen beziehen sich die angegebenen Werte wiederum auf aktuelle Vorhaben in den USA. Da es sich hierbei um Ethan-Cracker (mit höherem spezifischen Ethylen-Output) handelt, dürften entsprechende Investitionen in Europa (immer bezogen auf den Ethylen-Output) höher ausfallen. Die jüngste Neuinvestition in Nordwesteuropa war der BASF-Cracker in Antwerpen mit heute knapp über einer Million Tonnen Jahreskapazität und einem Investitionsvolumen von inflationsbereinigt etwa 1,2 Mrd. € zu Beginn der 1990er-Jahre (Erweiterung 2005 entsprechend berücksichtigt).¹³

Jeder Steam Cracker ist darüber hinaus auf einzigartige Weise in petrochemische Komplexe mit ihrem Rohstoff-, Gas- und Wärmemanagement eingebunden. Die Anlagen sind somit „Einzelstücke“ und nur wenige Komponenten der Hardware wie etwa Pumpen können bei einer Stilllegung noch anderweitig verwendet werden. Insofern sind mit dem Bau eines Steam Crackers in hohem Maße versunkene Kosten verbunden. Die in Tab. I-22 angegebenen Werte beziehen sich auf heutige Anlagen und es ist nicht davon auszugehen, dass sich die für heute angegebenen Werte in der Zu-

¹² Aktuelle Angaben aus der Presse für Investitionsprojekte in den USA.

¹³ Die ursprüngliche Investitionssumme für das 1994 abgeschlossene Projekt waren 1,3 Milliarden DM (https://www.boeckler.de/pdf/p_arbp_030.pdf), 2005 wurden zusätzlich 250 Mio. EUR in eine Erweiterung investiert. Die Summen wurden anhand des BIP-Deflators für die EU-28 auf €₂₀₁₅ umgerechnet.

kunft stark ändern werden. Durch die Anwendung insbesondere der Carbon-Capture-Technologie könnte sich der Anteil versunkener Kosten in Zukunft jedoch noch etwas erhöhen.

Der Großteil des heutigen Anlagen-Stocks hat seine technische Lebensdauer noch nicht erreicht. Eine erste kleine Stilllegungswelle betraf einzelne kleine Steam Cracker in Schottland (nach ca. 50 Jahren Laufzeit), Italien und Frankreich. Vorzeitige Stilllegungen von Steam Crackern sind bisher trotz bestehender Überkapazitäten in Europa selten, obwohl Altanlagen sehr viel ineffizienter sind als State-of-the-Art-Anlagen.

In der Literatur geht man von technischen Nutzungsdauern von 50-60 Jahren aus (s.o), aufgrund der nur seltenen vorzeitigen Stilllegungen kann hier davon ausgegangen werden, dass dieser Zeitraum auch der für heute typischen tatsächlichen Nutzungsdauer entspricht.

Durch die lange Planungs- und Bauzeit von insgesamt etwa fünf Jahren wird die unternehmerische Reaktionsfähigkeit sehr stark eingeschränkt.

Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

Aufgrund der nur wenigen bisher realisierten Anlagen können keine allgemeingültigen Daten zu Planungs- und Bauzeiten angegeben werden. Die Demonstrationsanlagen in Grangemouth (Schottland) wurden zu Beginn der 1990er im Labormaßstab aufgebaut, ein Demonstrator ging bereits 1994 in Betrieb. Da entsprechende Anbieter verfügbar sind, ist von einer vergleichsweise geringen Planungs- und Bauzeit zumindest für die heute übliche Anlagengröße (Kapazität < 100 kt/a) auszugehen.

Für größere Anlagen mit Einbettung in petrochemische Komplexe und entsprechenden nachgelagerten Verfahrensschritten sind jedoch längere Planungshorizonte vorzusehen.

Die Nutzungsdauer der bisher errichteten Anlagen lag bei deutschen Projekten unter 10 Jahren. Die Schließung war aber auf mangelnde Kostendeckung im Betrieb zurückzuführen und nicht auf einen entsprechenden Verschleiß. Tab. I-23 gibt eine Bandbreite für Investitionsvolumina vergangener Projekte wieder.¹⁴

Tab. I-23 Investitionsvolumina für Projekte zum Rohstofflichen Recycling von Kunststoffabfällen

Prozess	Verfahren	Jahreskapazität	Investitionssumme
BP (Grangemouth)	Pyrolyse	25 kt/a	15-20 Mio. britische Pfund (1998), entspricht etwa 30-39 Mio. EUR ₂₀₁₅
NKT	Pyrolyse	15 kt/a	13 Mio. EUR ₂₀₁₅
Akzo Nobel	Gasifizierung	50 kt/a	33 Mio. EUR ₂₀₁₅

Quelle: Tukker et al. (1999); eigene Zusammenstellung

¹⁴

Auch hier ist darauf hinzuweisen, dass es sich um vergleichsweise alte Daten handelt, die mit Hilfe des BIP-Deflators für die EU-28 auf €₂₀₁₅ umgerechnet wurden.

Die unternehmerische Reaktionsfähigkeit ist bei gegenwärtigen Anlagengrößen nur wenig eingeschränkt.

4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture

Entsprechend der Anwendung von CCS oder ggf. CCU bedarf es Infrastrukturen zum Transport und ggf. zur (Zwischen-)Speicherung von CO₂. Ansonsten können bestehende Infrastrukturen an bisherigen Cracker-Standorten zum Transport von Rohstoffen und Produkten in Pipelines sowie für Wärme genutzt werden (siehe Tab. I-24).

Tab. I-24 Abhängigkeit des Technologiefeldes Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon-Capture von Infrastrukturen

	Ja	Nein
Die Nutzung der Technologie(n) ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

Die Frage der Infrastrukturabhängigkeit kann nicht pauschal beantwortet werden.

Die Pyrolyse kann relativ unabhängig von Infrastrukturen betrieben werden, solange das Produktspektrum in erster Linie flüssige Produkte umfasst. Sobald Gase in größerer Menge produziert werden, sind ggf. Pipelines sinnvoll, um diese zu den Abnehmern aus der Chemieindustrie zu transportieren. Je nach Einbindung der Anlage in bestehende petrochemische Komplexe mit entsprechenden Infrastrukturen, kann der Aufwand hierfür jedoch relativ gering sein (z. B. zusätzliche Stichleitung).

Im Falle der Gasifizierung entsteht ein Synthesegas aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Auch diese müssen in Pipelines zu Anlagen der Weiterverarbeitung (z. B. Methanolsynthese) transportiert werden. Auch eine Einspeisung in bestehende lokale Wasserstoffnetze (z. B. Rhein-Ruhr, Mitteldeutschland) wäre möglich. Kohlenmonoxid-Leitungen gibt es dagegen aber nur innerhalb von Chemieparks.

4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität

Die Steam Cracker sind heute physisch in ein System eingebunden, in der sie essentielle Bestandteile der Wertschöpfungskette der Petrochemie bereitstellen. Umfang und Struktur der Produktion wirkt auf die Preisstrukturen in der Petrochemie. Andererseits sind die Steam Cracker in hohem Maße abhängig von den Rohstofflieferungen der Raffinerien. Konventionelle Steam Cracker älterer Bauart in Europa können

ausschließlich Naphtha verarbeiten. Dieses Rohbenzin wird ausschließlich durch Raffinerien bereitgestellt. Die Raffinerien selbst produzieren neben sehr vielen weiteren Produkten Propen und Aromaten als Beiprodukte im Katalytischen Cracker (FCC = fluidized bed catalytic cracker) bzw. im Reformier – jedoch nur in begrenztem Umfang und bilden somit kaum Konkurrenz für die Steam Cracker. Durch die stärkere Ausrichtung der europäischen Raffinerien auf Mitteldestillate (Diesel und Kerosin) während der 1990er und 2000er Jahre wurde Naphtha in Europa ein relativ günstiger Rohstoff. Allerdings wird es inzwischen vermehrt auf den amerikanischen und ostasiatischen Markt exportiert.

Gleichzeitig kam mit dem Aufkommen von Fracking in den USA und Kanada Ethan als neuer Petrochemie-Rohstoff auf den Markt, der in den USA einen Boom an Neuinvestitionen in Steam Cracker ausgelöst hat. Durch die Erschließung von Gasvorkommen durch Fracking in den USA wurden *Natural Gas Liquids* (NGL) in höherem Maße verfügbar. Hierbei handelt es sich um den Anteil flüssiger Kohlenwasserstoffe in entsprechenden Vorkommen, meist wird aber auch das gasförmige Ethan hierzu gezählt, weil es in der Flüssigphase vom Methan abgetrennt wird. Der Anteil von NGL an der Fracking-Ausbeute beträgt häufig über 25 %, das liegt über den meisten konventionellen Erdgasvorkommen (Fattouh und Brown 2014). Ethan wiederum hat daran typischerweise einen Anteil von etwa 40 % (ebd.).

Alleine in den USA gab es 2014 laufende Investmentprojekte in einer Größenordnung von 8,4 Mio. Jahreskapazität Ethan auf Basis von Ethan als Rohstoff (Fattouh und Brown 2014). Ethan-Cracker haben eine höhere Ausbeute an Ethylen und Propylen bezogen auf die eingesetzte Rohstoffmenge als Naphtha-Steam Cracker (Ren 2009). Die europäischen Hersteller, mit ihrer starken Einbindung in die Raffinerien und oftmals alten Anlagen, die nicht flexibel auf Feedstock-Änderungen reagieren können, sind dadurch in den Jahren seit der Finanzkrise 2008/2009 unter Druck geraten.

Derzeit sind Steam Cracker noch unverzichtbar bei der Bereitstellung der Plattform-Chemikalien für Polymere. Das könnte sich in Zukunft ändern. Abb. I-6 zeigt im grau unterlegten Bereich mögliche zukünftige Pfade auf. Diese könnten die Rohöl-Naphtha-Route ergänzen oder auch theoretisch ganz ablösen (Lechtenböhrer et al. 2016). Steam Cracker könnten jedoch auch in einem System ohne Rohöl weiterhin eine Rolle spielen, indem sie Naphtha oder Wachse aus Fischer-Tropsch-Anlagen zu Olefinen und Aromaten verarbeiten.

Durch die technologiespezifische Veränderung der Einführung von *Carbon Capture* ließen sich die Steam Cracker auch weitgehend in ein System mit Kohlenstoffkreisläufen einbinden. Somit wären die in der Abbildung dargestellten heutigen und zukünftigen Systeme parallel zu betreiben. Wasserstoff aus Elektrolyse könnte insoweit in Deutschland als Synthesegas erzeugt werden, als es der Strommarkt und die CO₂-Ströme der Steam Cracker und ggf. anderer industrieller CO₂-Quellen erlauben.

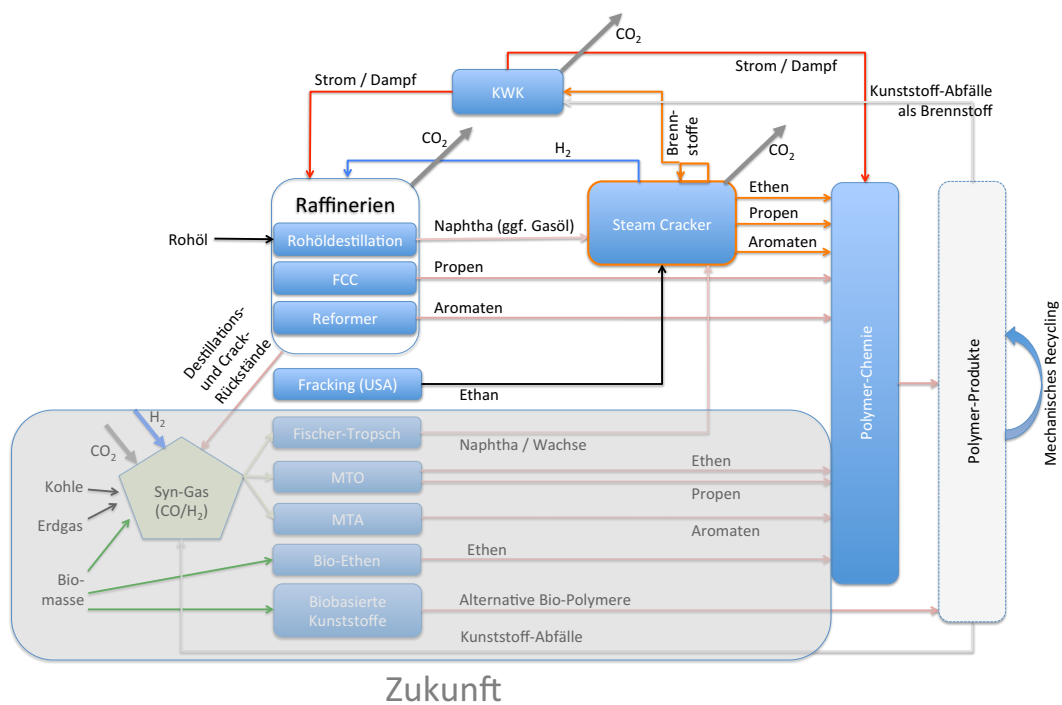


Abb. I-6 Abbildung der Einbindung von (hocheffizienten) Steam Crackern und von Konzepten zur rohstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen in den Stoffstromkreislauf der Olefin- (bzw. Polymer-)Produktion

Quelle: eigene Abbildung

Pyrolyse und/oder Gasifizierungskonzepte könnten zusätzlich die Kohlenstoff- und Wasserstoffkreisläufe schließen und damit die inländischen Erzeugungspotentiale erhöhen. Wie bereits dargelegt, sind diese Konzepte insbesondere in einem ambitionierten Szenarioumfeld (95 % THG-Minderung gg. 1990) relevant, denn hier müsste die Referenztechnologie selbst (Müllheizkraftwerk) mit Carbon Capture ausgestattet werden, um CO₂-Neutralität annähernd zu gewährleisten. Die beiden Szenarien einer alternativen Kunststoffverwertung durch Gasifizierung oder Verstromung (hier mit CCS) wurden für ein dekarbonisiertes Industriesystem der Zukunft im Rahmen der Studie (Samadi et al. 2016) für das Industrie-Cluster des Rotterdamer Hafens einander gegenübergestellt. Falls CCS jedoch für Deutschland ausgeschlossen bleibt, müsste der CO₂-Strom nach der Isolierung aus dem MVA-Abgasstrom aufbereitet werden, um ihn wiederum als Synthesegas (im Rahmen von CCU) nutzbar zu machen. Der Gesamtwirkungsgrad wäre damit deutlich ungünstiger als im Falle einer direkten rohstofflichen Verwertung. Als einziger Vorteil verbliebe eine zusätzliche Flexibilität der Stromerzeugung.

Über die inländisch erzeugten Produkte hinaus könnten Plattformchemikalien (z. B. Methanol) oder Polymere aus Regionen importiert werden, die über größere Potenziale zur Erzeugung von erneuerbaren Energien verfügen (MENA-Raum, Golf-Staaten).

5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand

5.1 Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture

Die öffentliche Forschungsagenda im Bereich Petrochemie konzentriert sich derzeit auf den Bereich Power-to-Chemicals, d. h. die Herstellung von Basischemikalien auf Basis von strombasierten Plattformchemikalien wie Wasserstoff (siehe *Technologiefeld 4.3: Power-to-liquids/chemicals*).

Diese Konzentration erscheint gerechtfertigt, sind doch die Vorlaufzeiten und unternehmerischen Risiken hier bedeutend höher, während es sich bei den neuartigen Naphtha Steam Cracker Technologien um Technologien handelt, die einen vergleichsweise hohen TRL aufweisen. Zwar gibt es in Deutschland einen Anbieter von Steam Cracking-Technologie, die Forschung im Bereich neuartiger optimierter Technologie fand jedoch zuletzt außerhalb Europas statt.

Aufgrund der nur eingeschränkten Potenziale der Technologie zur Erreichung ökologischer, ökonomischer und industriepolitischer Ziele in Deutschland wird empfohlen, die öffentliche Unterstützung der Forschung im Bereich der eigentlichen Steam Cracking-Technologie nicht zu intensivieren – trotz der großen Bedeutung, die die Technologie im Rahmen einer dekarbonisierten Industrie weltweit einnehmen könnte.

Anders kann die Aussage jedoch in Bezug auf die Carbon Capture-Technologie und ihre Anwendung in Steam Crackern ausfallen. In diesem Feld bestehen inländische Wertschöpfungspotenziale durch den weltweiten Markt, gleichzeitig kann diese Technologie auch einen Beitrag zu den klimapolitischen Zielen Deutschlands leisten. Für eine endgültige dahingehende Bewertung müssen jedoch auch die differenzierten Bewertungen zum Stand der Forschung im *Technologiefeld 2.3: CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS)* (bzw. auch 2.4: *CO₂ Nutzung*) berücksichtigt werden.

Die *systemanalytische* Forschung zur Integration von hocheffizienten Steam Crackern mit Carbon Capture in kohlenstoffarme bzw. kohlenstoffneutrale Industriecluster sollte intensiviert werden, um Perspektiven für die zahlreichen bestehenden petrochemischen Standorte in Deutschland bzw. Nordwesteuropa im Rahmen einer sehr weitgehenden Dekarbonisierung der Wirtschaft zu eröffnen.

5.2 Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

Das chemische Recycling von Kunststoffabfällen konnte sich bisher noch nicht in kommerziellen Anwendungen bewähren. Vor dem Hintergrund der Unsicherheit der Versorgung mit Öl wurden F&E in der Vergangenheit staatlich gefördert, die Unsicherheit besteht auf mittlere Frist auch weiterhin.

Die bisher mangelnde Anwendung der Technologien liegt vor allem an der fehlenden Wirtschaftlichkeit einer rohstofflichen Wiederverwertung (inkl. niedriger Ölpreise) und an der Unsicherheit über die Lieferung von Kunststoffabfällen mit einem definierten Vergütungssatz. Aus diesem Grund wurde beispielsweise das BASF-Pyrolyse-Projekt in den 1990er-Jahren gestoppt.

Auch wenn die wissenschaftlichen Grundlagen gelegt sind, so besteht weiterhin Entwicklungsbedarf im Anlagenbau. Mit der Verbesserung der katalytischen Verfahren kann die Selektivität der Pyrolyse weiter gesteigert und damit wirtschaftlicher werden. Demonstrationsprojekte sind aufgrund der unsicheren wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Deutschland selten geworden, erzeugen aber die notwendigen Lerneffekte.

Insofern wird empfohlen neben der Grundlagenforschung auch integrierte Konzepte einer rohstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen mit Integration in die Wertschöpfungsketten zu fördern – auch wenn die THG-Minderungseffekte erst langfristig relevant werden dürften.

5.3 Ergebnis der Online-Umfrage

In den Abbildungen I-7 bis I-9 sind die Ergebnisse der Online-Umfrage unter den BMWi-Forschungsnetzwerken vom April 2017 für das Technologiefeld *Low-carbon Kunststoffe* wiedergegeben. 86 % der Befragten weisen für Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture ein mittleres bis hohes nationales Marktpotential aus (Abb. I-7), für das internationale Marktpotenzial geben 82 % der Experten diese Einschätzung. Offenbar besteht ein Zusammenhang zwischen den Einschätzungen des Marktpotenzials und des öffentlichen Forschungsbedarfs, denn die Blasen in der folgenden Abbildung liegen in etwa auf der Diagonalen.



Abb. I-7 Ergebnis der Online-Befragung zu Forschungsbedarf und Marktpotenzial im Technologiefeld „Low carbon Kunststoffe“ – A) Hocheffiziente Steam Cracker mit Carbon Capture

Quelle: ifo Institut (2017)

Hinsichtlich der Einschätzung des öffentlichen Forschungsbedarfs liegt die häufigste Nennung mit 32 % bei „mittel“, fast die Hälfte der Befragten (48 %) hält den Bedarf für „groß“ oder „sehr groß“ (Abb. I-8).

Frage: "Wie schätzen Sie den öffentlichen Forschungsbedarf der nachfolgenden Technologien ein?"

Technologiebereich: Technologien zur CO₂-Reduktion in der Industrie

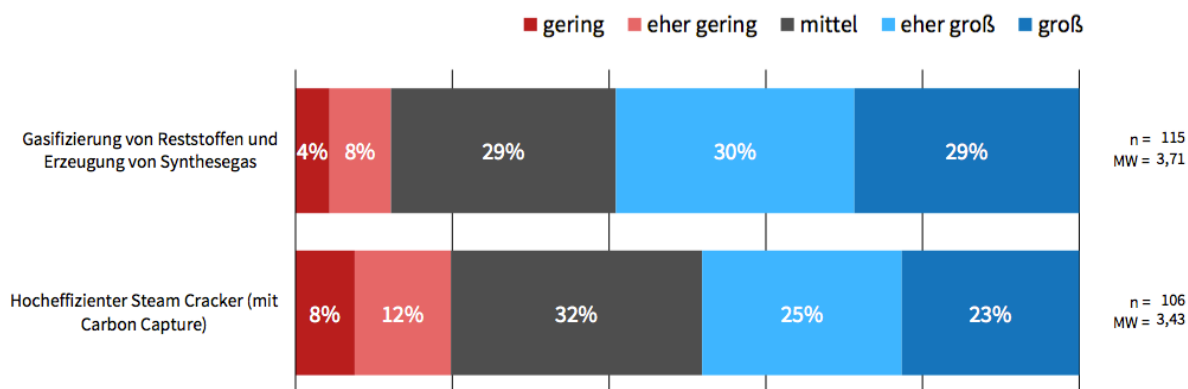


Abb. I-8 Ergebnis der Online-Befragung zum Forschungsbedarf im Technologiefeld „Low carbon Kunststoffe“

Quelle: ifo Institut (2017)

Noch etwas höher wird der öffentliche Forschungsbedarf im Bereich der *Gasifizierung von Reststoffen* (mit Erzeugung von Synthesegas) eingeschätzt: 29 % halten hier den Bedarf für „mittel“, während 59 % hier „groß“ oder sehr „groß“ angeben.

Im Vergleich zu dem im vorliegenden Bericht getroffenen Einschätzungen zum Bereich *Chemisches Recycling von Reststoffen* muss darauf hingewiesen werden, dass Verfahren wie die Pyrolyse, die unter dem Feld „Chemisches Recycling von Reststoffen“ mit behandelt wurden, nicht unter den Begriff „Gasifizierung“ fallen. Insofern ist die Abgrenzung der Technologien hier nicht vollständig deckungsgleich.

Auch hier gibt es hinsichtlich der Einschätzung des Marktpotenzials und des öffentlichen Forschungsbedarfs einen Zusammenhang – zumindest bezogen auf das internationale Potenzial (rote Blasen in Abb. I-9 liegen auf einer Diagonalen). Dieses wird insgesamt höher eingeschätzt als das nationale Potenzial.

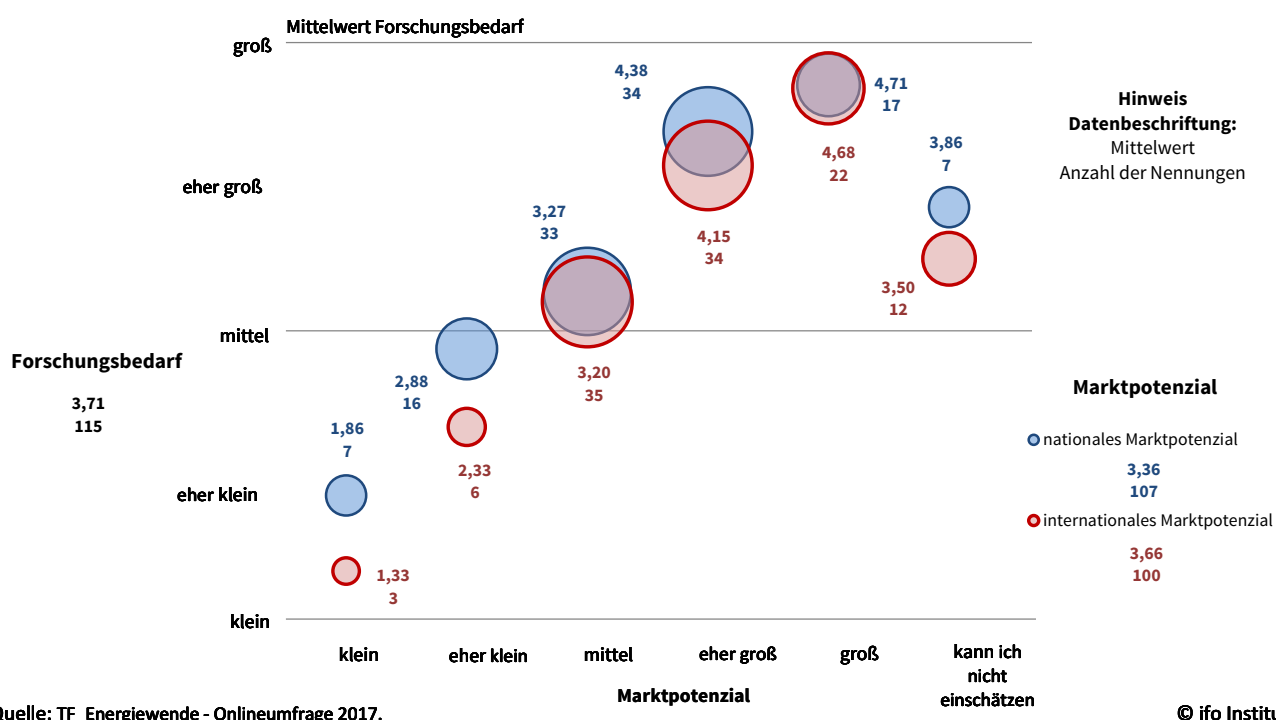


Abb. I-9 Ergebnis der Online-Befragung zu Forschungsbedarf und Marktpotenzial im Technologiefeld „Low carbon Kunststoffe“ – B) Gasifizierung von Reststoffen und Erzeugung von Synthesegas

Quelle: ifo Institut (2017)

II Power-to-heat

1 Beschreibung des Technologiefeldes

Nachfolgend werden in diesem Bericht die Power-to-Heat-Technologien als industrielle Querschnittsanwendung behandelt. Da diese sehr unterschiedlich sind, können sie nur zum Teil übergreifend (z. B. bei den Kriterien Akzeptanz oder Abhängigkeit von Infrastrukturen) als Ganzes behandelt werden. In den Fällen, wo eine Einzelbetrachtung der Sub-Technologien erforderlich ist, werden beispielhaft relevante Technologien (z. B. induktive Erwärmung) bzw. Branchen (z. B. Stahlindustrie) oder Anwendungen (z. B. Dampferzeugung) analysiert. In beiden Fällen ist häufig eine Unterscheidung in hybride (elektrische *und* brennstoffbasierte) sowie monovalente (rein elektrische) Ausführung bzw. in flexibilisierte und nicht flexibilisierte (Grundlast-) Fahrweise sinnvoll.

1.1 Power-to-Heat – Definition und Abgrenzung

Als Power-to-Heat (PtH) werden Umwandlungstechnologien bezeichnet, bei denen elektrischer Strom in Wärme transformiert wird. Insofern stellt PtH eine Kopplung zwischen den Sektoren Strom und Wärme dar. Über die Art der Umwandlung ist dabei noch keine Aussage getroffen. Es kann sich um rein elektrische Verfahren handeln, die Strom als Hauptenergiequelle direkt oder indirekt in Wärme umwandeln, oder um Verfahren, bei denen Strom als Hilfsenergie dient, um vorhandene (Niedertemperatur-)Wärme (z. B. Abwärme oder Umweltwärme) auf ein höheres und somit technisch nutzbares Temperaturniveau zu heben. Das klassische Beispiel für den letzteren Anwendungsfall ist die elektrisch betriebene Wärmepumpe (WP). Aber auch ein elektrischer Brüdenverdichter kann dazu dienen, nicht mehr nutzbaren Wasserdampf auf ein wieder nutzbares Druck- und Temperaturniveau anzuheben (Wolf et al. 2012: 2; 2014: 3).

PtH-Anwendungen kommen in den Sektoren Haushalte, GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistung) und Industrie vor (vgl. Abb. II-1). In diesem Kapitel werden nur die *industriellen* PtH-Anwendungen zur Erzeugung von Prozesswärme betrachtet. Als weitere Einschränkung werden hier keine Wärmepumpen behandelt, da sie bereits in den Technologiefeldern 1.7: *Umweltwärme* (für nicht-industrielle Anwendungen) bzw. 6.2: *Energieeffiziente Querschnittstechnologien* (industrielle Großwärmepumpen) erfasst sind.

Haushalte und Gewerbe	Industrie und Prozesswärme
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Widerstands-Heizsysteme <ul style="list-style-type: none"> – Heizstäbe – Strömungserhitzer – Flächenheizsysteme – Infrarotstrahler ▪ Elektrodenheizkessel (Gewerbe) ▪ Elektrische Wärmepumpe ▪ Bivalente (hybride) Wärmesysteme 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prozesse und Verfahren <ul style="list-style-type: none"> – Konduktive Widerstandserwärmung – Induktive Erwärmung – Hochfrequenz Erwärmung – Magnetische Gleichstrom-Erwärmung – Elektrische Infrarot Erwärmung ▪ Elektrodenkessel (ggf. mit KWK) ▪ Elektrische Wärmepumpen

Abb. II-1 Technologien für elektrische Wärmeerzeugung in verschiedenen Sektoren

Quelle: Kleimaier (2016: 13)

1.2 Physikalische PtH-Verfahren und ihre Anwendungen

Grundsätzlich wird zwischen direkten und indirekten elektrischen Erwärmungsverfahren differenziert. Bei den *direkten* Verfahren (induktiv / konduktiv / dielektrisch) geschieht die Umwandlung in Wärme im Werkstück selbst, ohne dass es eines Wärmeträgermediums bedarf. Bei den *indirekten* Verfahren (indirekte Widerstands- / Lichtbogen- / Infrarot-Erwärmung) findet die Umwandlung in Wärme außerhalb des Werkstücks statt. Die Wärme wird über die Werkstoffoberfläche eingetragen, entweder - mit Hilfe eines Wärmeträgermediums (Luft, Dampf, Flüssigkeitsbäder...) - über Wärmeleitung und Konvektion oder über Wärmestrahlung (Infrarot).

Es gibt eine Vielzahl von PtH-Technologien, die im Rahmen dieses Technologieberichtes nicht alle einzeln behandelt werden können. Daher sind die relevanten Technologien synoptisch in Tab. II-1 mit ihren jeweiligen physikalischen Prinzipien, Anwendungen bzw. Branchen und - soweit verfügbar - mit Angaben zur Leistungsgröße, Wirkungsgraden und Temperaturniveau zusammengestellt. Die Wärmepumpen sind nur der Vollständigkeit halber aufgeführt, werden aber - wie oben erwähnt - in anderen Kapiteln detailliert behandelt.

Als für die Elektrifizierung von Prozesswärme relevant wurden insbesondere folgende Branchen identifiziert:

- Papier und Pappe
- Raffinerien
- Grundstoffchemie
- Glas, Keramik
- Zement, Kalk, Ziegel
- Eisen & Stahl
- NE-Metalle & Eisengießereien

Tab. II-1 Gliederung, technische Kenndaten und Anwendungsbeispiele für PtH-Technologien

Verfahren	Prinzip	Anwendungen	el / th Leistung	eta	Temp.-Niveau
Direkte elektrische Prozesswärme					
Konduktive Erwärmung (ohmsche Widerstandsheizung)	ohmsche Widerstandsheizung, bei der das Werkstück Teil des Stromkreises ist	Eisen-, Stahl- und Nichteisenmetallindustrie: <ul style="list-style-type: none"> Herstellung von Graphit und Siliciumcarbid Widerstandsschweißverfahren Erwärmung von Halbfabrikaten (Knüppeln, Stangen, Rohren, Drähten, Blechen, Bändern) vor der Umformung oder Wärmebehandlung in der Stahl- und Nichteisenmetallindustrie Schmelzen von Glas Schmelzflusselektrolyse von Aluminium 	bis 1.600 kVA, 10.000 - 30.000 A		Stahldrahterwärmung: bis 4,8 t/h
Elektrodenkessel	Heißwasser- und Dampf-Erzeugung mittels an Elektroden angelegter Hochvolt-Wechselspannungen (Wasser als elektrischer Leiter)	<ul style="list-style-type: none"> Erzeugung von Fernwärme (z. B. Nürnberg und Flensburg) Wasser wird dabei auf 100°C erhitzt und in Heißwasserspeicher eingespeist 	1 bis 90 MW _{th}		
Induktive Erwärmung (Wechselstrom)	ohmsche Erwärmung durch Erzeugen eines Wirbelstroms in einem elektrischen Leiter mit Hilfe eines Wechselstrom-Magnetfeldes in einer Induktionsspule („Induktor“)	<ul style="list-style-type: none"> Induktionshärten Schmelzen von Metallen, Speziallegierungen und Nichtmetallen (z. B. von Gläsern und Oxiden) Rühren und Durchmischen von Metallschmelzen (mittels elektromagnetischer Kräfte) induktives Schweißen und Fügen Sondervverfahren (induktives Schwebeschmelzen und Zonenschmelzverfahren zur Züchtung von Silizium-Einkristallen in der Halbleiterindustrie) 			
Magnetische Gleichstromerwärmung	Rotation des Werkstücks in statischem Magnetfeld mittels supraleitender Spule	z. B. schnelle Erwärmung von Extrusionsblöcken		> 80 %	
Dielektrische Erwärmung: a) Hochfrequenz-Erwärmung bis ca. 500 MHz (= Kondensatorfelderwärmung)	Prinzip der dielektrischen Erwärmung durch Anregung polarisierter Moleküle mit Hilfe eines hochfrequenten elektrischen Feldes (vgl. Mikrowelle)	Erwärmung und Trocknung von Stoffen mit polaren Moleküleigenschaften (wasserhaltige Stoffe, Gummi, Kunststoffe wie PVC, Polyester, GFK, Melaminpressharz) in der Papier-, Holz-, Möbel-, Textil-, Kunststoff und Lebensmittelverarbeitung und chem.-pharmazeutischen Industrie HF-Erwärmung: <ul style="list-style-type: none"> Trocknung und Verleimung von Holz- und Zellstoffprodukten 			industrielles Magnetron: 80 % (züglich Verluste auf Weg zum Produkt)

Verfahren	Prinzip	Anwendungen	el / th Leistung	eta	Temp.-Niveau
b) Mikrowellenerwärmung ab ca. 500 MHz		<ul style="list-style-type: none"> Trocknung von Textil- und Glasfasern sowie Papierbahnen Vorerwärmung und Verschweißung von Kunststoff und Pressmassen Auftauen und Konservieren von Rohstoffen und Nahrungsmitteln 		150 - 200 kWh/m ³ Spanplatte	
Indirekte elektrische Prozesswärme					
Elektro-Ofen (Indirekte Widerstandserwärmung)	Erzeugung der Wärme in metallischen oder keramischen Widerstandsheizelementen und Übertragung der Wärme über Strahlung und Konvektion auf das Werkstück oder ein Wärmedium (Wasser, Dampf, Thermoöl, Luft...)	<ul style="list-style-type: none"> Wärmebehandlungsöfen in der Metall-, Keramik- oder Glasindustrie, Nahrungsmittelindustrie, chem. Industrie, Elektronikindustrie Bauformen: Kammerofen, Haubenofen, Herdwagenofen, Durchlauföfen, Horizontaler Rohofen / Diffusionsöfen 			1.200°C (CrNi) bis 3.000°C (keramisch)
Elektro-Kessel (Indirekte Widerstandserwärmung)	Erzeugung von Heißwasser oder Dampf über metallische oder keramische Widerstandsheizelemente (Übertragung der Wärme über Strahlung, Leitung und Konvektion)	<ul style="list-style-type: none"> zahlreiche Anwendungen bzw. Querschnittstechnologien 	einige 100 kW _{el}		
Infraroterwärmung (Strahlungswärme)	Wärmeübertragung durch elektromagnetische Strahlung von Heizelement-Oberflächen auf Werkstück-Oberflächen	<ul style="list-style-type: none"> Trocknen und Polymerisieren von Farben und Lacken Erwärmen thermoplastischer Kunststoffe Trocknen von Textilien, Papier, Keramik oder Kunststoffen Härten von Klebstoffen Lötprozesse 	kurzwellig: bis 60 kW/m ² , langwellig: bis 300 kW/m ²	50 % (im Mittel)	1.000 bis 3.000 Kelvin (kurzwellige Strahler) bis 1.000 Kelvin (langwellige Strahler)
Lichtbogenerwärmung	<ul style="list-style-type: none"> Selbstständige Gasentladung in Form eines Plasmas, wobei elektr. Energie in Wärme umgesetzt wird Zündung des Lichtbogens durch hohen Kurzschlussstrom mit anschließendem Zurückfahren der Elektroden Wärmeübertragung vom brennenden Lichtbogen auf das Gut 	<ul style="list-style-type: none"> Elektrostahl-Recycling in Drehstrom- oder Gleichstrom-Lichtbogenöfen (ca. 1/3 weltweit) Acetylen-Herstellung Lichtbogenreduktionsöfen: Reduktion von Eisenschwamm oder Metalloxyden mittels Koks zur Gewinnung von Ferrolegierungen, Silizium, Calciumkarbid und Phosphor Elektroschlacke-Umschmelzen (ESU) / Vakuumlichtbogenumschmelzen: Produktion von hochwertigen Stählen, Superlegierungen 	bis über 100 MVA Stromdichte: 1.000 A/cm ² Durchmesser Plasma-kanal: bis zu 13 cm Lichtbogenlän-	450 kWh/t (Ziel)	bis 9.000 K

Verfahren	Prinzip	Anwendungen	el / th Leistung	eta	Temp.-Niveau
	durch Leitung, Konvektion und Strahlung	und hochreaktiven Metallen (z. B. Titan, Zirkonium) ▪ Lichtbogenschweißen: thermisches Trennen und Spritzen von Metallen	ge: bis zu 1,2 m		
Plasma-Erwärmung	a) Plasmastrahlverfahren: Ionisation eines Gasstroms (z. B. Argon) in einem Lichtbogen oder im hochfrequenten elektrischen oder magnetischen Feld b) Plasmawärmebehandlungs- bzw. Plasma unterstützte Beschichtungsverfahren: Schichtbildung eines Arbeitsgases am Werkstück durch Ionisation im Vakuumofen c) Plasmaverbindungsschweißen	a) Plasmastrahlverfahren: ▪ Schmelzen, Schneiden oder Schweißen von hochschmelzenden Werkstoffen und Speziallegierungen (z. B. Titan, Tantal, Molybdän, Niob) ▪ insbesondere Schmelzen von Edelstahl aus Schrott (Öfen mit max. 45 Tonnen Kapazität) b) Plasmawärmebehandlung- und Beschichtungsverfahren: ▪ CVD: Chemical Vapour Deposition ▪ PVD: Physical Vapour Deposition	a) bis 28 MW _{el} (Öfen bis 45 t) Leistungsdichten bis ca. 107 W/m ² b) Thyristor-gesteuerte Generatoren mit bis zu 1.000 kW (Behälter mit bis zu 50.000 Liter / 36 t)		7.000 K - 20.000 K (P-Strahlverfahren) 350°C - 1.200°C (P-Behandlungsverfahren)
Elektronenstrahl-Erwärmung	Elektronenstrahlkanone: Emission von Elektronen aus beheiztem Wolfram- oder Tantaldraht (2.900 K) durch Anlegen einer Beschleunigungs-Hochspannung (i.d.R. im Hochvakuum)	▪ Schmelzen, Schweißen, Beschichten, Bedampfen, Einlegieren und Oberflächen-Wärmebehandlung von metallischen Werkstoffen höchster Reinheit ▪ Luft- und Raumfahrtindustrie (Schweißen von Triebwerksteilen), Reaktorbau, Elektroindustrie (Schweißen spezieller Kontakte oder Supra-Leiter), Automobilbau (Herstellung von Kolben, Ventilen etc.)	100 KW - 1 MW (10 - 109 W/cm ²) Schmelzöfen bis 100 t		
Elektrische Wärmepumpen	thermodynamischer Kreisprozess mit Verdampfung (Wärmeaufnahme auf niedrigem Temperaturniveau), Verdichtung (elektr. Kompressor), Kondensation (Wärmeabgabe auf höherem Temperaturniveau) und Entspannung (Drossel)	▪ hocheffiziente Energiebereitstellung auf niedrigem Niedertemperaturniveau (ca. 35 - 75 °C) für Brauchwarmwasser, Prozess- und Raumwärme ▪ Nutzbarmachung von NT-Abwärme, geothermischer und Umgebungswärme durch Heben auf ein höheres Temperaturniveau ▪ Wärme-Kälte-Kopplung ▪ Vorerwärmung / Anhebung der Vorlauftemperatur (mit anschl. Nacherhitzer) ▪ Nahrungsmittel-, Papier- und Chemieindustrie (insbesondere, wenn höhere Temperatur bis 140°C erschlossen werden können) ▪ Fernwärmeerzeugung (Bsp. aus Schweden und Schweiz)	ca. 1 kW _{th} bis 34 MW _{th}	COP = ca. 200 - 500 % (abhängig vom Temp.-Hub) > 700 % bei gleichzeitiger Kältenutzung	65 bis 75°C (einstufig) bis 80°C (mehrstufig) bis ca. 100°C (HT-WP) > 140°C (mit R245fa, in Entwicklung)

Quellen: Eigene Zusammenstellung, basierend auf Pfeifer (2013), Paar et al. (2013: 113) / www.vapec.ch / www.power-to-heat.eu/power-to-heat

2 Stand F&E in Deutschland

2.1 Projekte und Forschungscluster

Grundsätzlich existieren mittlerweile zahlreiche Projekte, Plattformen und Cluster bzw. Virtuelle Institute, die zu dem Thema „Power-to-Heat“ forschen, z. B.:

- Virtuelles Institut NRW - Strom zu Gas und Wärme:
Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI)
www.strom-zu-gas-und-waerme.de
- Innovationsforum Power-to-Heat:
Fachgebiet Energiewirtschaft der Brandenburgischen Technischen Universität
Cottbus-Senftenberg
www.innovationsforum-p2h.de
- Dialogplattform Power to Heat:
Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (efzn) / Goslar
www.efzn.de/de/veranstaltungen/powertoheat/p2h-2016
- Power-to-Heat Vernetzungsplattform:
NEW ENERGY Capital Invest GmbH / Wien
www.power-to-heat.eu/power-to-heat

Teilweise werden die Themen auch am Rande von Energieeffizienzclustern behandelt, z. B. bei der Plattform „EnEff:Industrie“ (www.eneff-industrie.info). Bisher ist das Thema PtH jedoch vorwiegend relevant im Haushaltsbereich (Einsatz von Wärmepumpen, siehe Technologiefeld 1.7 *Umweltwärme*) sowie bei Fernwärmenetzen (Einsatz von Heizstäben, Elektrodenkesseln oder Industrie-Wärmepumpen).

Eine systematische Analyse der PtH-Potenziale über verschiedene Industriebranchen und Technologien hinweg ist nach Kenntnis der Autoren noch nicht in der Literatur verfügbar. Eine Suchabfrage in dem zentralen Informationssystem Energieforschungsförderung EnArgus des BMWi (www.enargus.de) ergibt zwar 195 Treffer für den Begriff „Power-to-Heat“ und 119 Treffer für den Begriff „Prozesswärme“. Die UND-Verknüpfung reduziert das Ergebnis jedoch auf 2 Treffer mit geringer Relevanz für die hier betrachtete Fragestellung („CPC-Vakuumröhrenkollektor für solarthermische Großanlagen“ und „Forschung und Entwicklung eines Brenners zur thermischen Verwertung von staubförmigen (Rest-)Stoffen inklusive Prozesswärmebereitstellung“).

Insbesondere wurden bisher kaum langfristige Elektrifizierungspotenziale industrieller Prozesswärme untersucht, deren Entwicklung für eine (nahezu vollständige) Dekarbonisierung auch des Industriesektors unerlässlich ist. Häufig beschränken sich Untersuchungen auf kurz- bis mittelfristig erschließbare Flexibilisierungspotenziale mit eher ökonomisch orientiertem Fokus, z. B. unter Nutzung kostengünstigen Überschussstroms oder zur Teilnahme am Regelenergiemarkt (Krzikalla et al. 2013: 36). So ermöglicht beispielsweise die Anfahr- und Regelcharakteristik eines Elektroden-

kessels die Teilnahme am Regelenenergiemarkt¹⁵. Diese Potenziale machen jedoch nur einen Bruchteil der gesamten technischen Elektrifizierungspotenziale aus.

2.2 Technologiespezifische Entwicklungspotenziale

Zu einzelnen Technologien können z. T. allgemeine Aussagen hinsichtlich ihrer Zukunftsaussichten und ihres Forschungsbedarfes gemacht werden. So erfordert beispielsweise das Verfahren der *Konduktiven Erwärmung* einen möglichst konstanten Werkstückquerschnitt und verliert daher wegen zunehmender geometrischen Komplexität vieler Bauteile (z. B. in der Automobilindustrie) an Bedeutung (Pfeifer 2013: 266).

Dem hingegen wird der *Induktiven Erwärmung* eine zunehmende Bedeutung beigemessen aufgrund höherer Anforderungen an die Werkstoff-Qualität und an einen möglichst wirtschaftlichen, umweltfreundlichen und rohstoffsparenden Ressourceneinsatz. Dieses Verfahren weist einen Zusatznutzen dadurch auf, dass eine (steuerbare) Rührwirkung und Durchmischung von Metallschmelzen aufgrund elektromagnetischer Felder erzielt wird. Ein rasches Einrühren an der Schmelzoberfläche reduziert unerwünschte Materialverluste durch Abbrand. Durch die homogene Durchmischung werden neue oder verbesserte Eigenschaften von Werkstoffen (z. B. beim Strangpressen, bei der Erstarrung spezieller Legierungen und bei der Halbleiterkristallzüchtung für Mikro- und Leistungselektronik oder Photovoltaik) möglich. Hier besteht noch weiteres erhebliches Entwicklungspotenzial bezüglich des gezielten Einsatzes einer Strömungsbewegung oder -Dämpfung (Pfeifer 2013: 266).

Bei der *Dielektrischen Erwärmung* (Hochfrequenz-Erwärmung bis ca. 500 MHz bzw. Mikrowellenerwärmung ab ca. 500 MHz) wird ebenfalls noch großes Entwicklungspotenzial gesehen, z. B. bei der thermischen Behandlung von keramischen Werkstoffen (mikrowellenunterstütztes Sintern von Keramiken und Entbindern beim Spritzgießen keramischer Massen) (Pfeifer 2013: 266).

Bei der *Lichtbogen-Erwärmung* werden für die Stahlindustrie in der Literatur folgende Entwicklungsziele genannt: durchschnittliche Chargenzeiten von 30 Minuten, Senkung des elektrischen Energiebedarfs auf etwa 450 kWh/t und des Graphitverbrauchs auf 1 kg/t Stahl sowie die Nutzung der Abgasenthalpie zur Schrottvorwärmung (Pfeifer 2013: 311).

Die *Elektronenstrahl-Erwärmung* bietet noch Potenzial bei der Reduzierung der Investitionskosten und der Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit (Pfeifer 2013: 326).

¹⁵

Nach eigenen Angaben werden z. B. ca. 70 MW Regelleistung durch Hochspannungs-Elektrokessel eines Herstellers am deutschen Regelenenergiemarkt bereitgestellt [Quelle: www.vapec.ch].

3 Relevanz öffentlicher Förderung

3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

Bezogen auf einzelne PtH-Technologien wurde in Kapitel 2.2 beispielhaft eine grobe Einschätzung ihrer Zukunftsaussichten und ihres Forschungsbedarfes vorgenommen. Auch wenn es, wie dort geschildert, noch F&E-Bedarf in den vielversprechenden Technologien wie beispielsweise induktive, dielektrische, Lichtbogen-, Plasma- und Elektronenstrahl-Erwärmung gibt, so sind diese Technologien an sich bereits kommerziell verfügbar. Ihr Einsatz ist jedoch bisher in der Regel auf Anwendungen beschränkt, wo andere Erwärmungstechnologien prinzipbedingt z. B. keine hinreichende Produktqualität oder Verarbeitungsgeschwindigkeit bieten. Legt man den Fokus jedoch - im Sinne einer langfristigen Dekarbonisierung - auf die Elektrifizierung an sich, so sind durchaus noch große Anwendungspotenziale zu erwarten. Die eigentliche Herausforderung besteht dabei in der Integration der elektrischen Erwärmungstechnologien in die unterschiedlichen Produktions- und Verarbeitungsprozesse. Dabei ist sowohl eine monovalente (rein elektrische), aber insbesondere für Bestandsanlagen und für eine Übergangszeit auch eine hybride bzw. parallele (elektrische *und* brennstoffbasierte) Prozessführung denkbar:

- 1 | Monovalent-elektrisch betriebener Prozess:
 - Diskontinuierlicher Batch-Prozess mit Kapazitätserhöhung und Produktspeicher (Lager)
 - Kontinuierlicher (teillastfähiger) Prozess
- 2 | Hybrider Produktionsprozess (mit zwei Heizsystemen):
 - Bypass: Zweites (elektrisch beheiztes) Zuführungssystem (z. B. zusätzliche Zuführung mit Widerstandsheizung)
 - Zweites Heizsystem im gleichen Aggregat (z. B. zusätzliche Widerstandsheizung im brennstoffbeheizten Ofen)
- 3 | Parallele Produktionsprozesse (zwei unterschiedliche Produktionslinien):
 - Kapazitätserhöhung durch (zusätzlichen) vollständig elektrisch betriebenen Produktionsprozess (Bsp. brennstoffbeheizter Ofen + zusätzlichem Mikrowellenofen)

Da der Aufwand für die oben beschriebene Prozessintegration branchen- und produktspezifisch sehr unterschiedlich ausfällt, kann keine allgemein verbindliche Aussage zu den Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung getroffen werden. Während beispielsweise in der Stahlbranche bereits heute kommerziell Elektroschmelzverfahren eingesetzt werden, ist in der Zementindustrie (beispielhaft in Tab. II-2 ausgeführt) nicht zu erwarten, dass in den kommenden Jahren elektrisch betriebene Drehrohröfen im industriellen Maßstab verfügbar sein werden. Der Grund für diese Einschätzung liegt darin, dass thermodynamisch und prozesstechnisch ein völlig neues Anlagendesign entwickelt werden müsste, dazu nur Neuanlagen in Frage kämen und – in Konkurrenz zu den heutzutage eingesetzten sehr billigen Ersatzbrennstoffen – große Mengen günstigen Stroms zur Verfügung stehen müssten.

Tab. II-2 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung am Beispiel der Stahl- (Elektroschmelzverfahren) und der Zementindustrie (elektrisch beheizter Drehrohrofen)

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Elektroschmelzverfahren

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☒ bis 2030 ☐ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☒ bis 2030 ☐ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Elektrisch beheizter Drehrohrofen

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☐ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☒

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☐ bis 2040 ☒ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

Teilkriterium 2.1 Entwicklungsstadium

Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, sind die PtH-Technologien an sich bereits kommerziell verfügbar, auch wenn sie noch z. T. erhebliches Optimierungspotenzial aufweisen.

Die Einstufung des Entwicklungsstadiums wird daher nachfolgend beispielhaft anhand prozesstechnischer PtH-Anwendungen in repräsentativen, energieintensiven Branchen vorgenommen. Dabei wird zwischen elektrischer Dampferzeugung (To) unterschieden, die quer zu den Branchen angewandt werden kann, und PtH-Anwendungen, die brennstoffbeheizte Systeme (Brenner bzw. Öfen) in den jeweiligen Branchen ersetzen (T1 bis T5).

- To: elektrische Dampferzeugung (Querschnittstechnologie)
- T1: Papier und Pappen
- T2: Grundstoffchemie
- T3: Glas, Keramik
- T4: Zement, Kalk, Ziegel
- T5: Eisen & Stahl

Tab. II-3 Aktuelle Entwicklungsstadien für PtH-Anwendungen für elektrisch erzeugten Dampf (T0) und als Brennstoffersatz für fünf beispielhafte Branchen (T1 bis T5)

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	T0 Da.	T1 Pa.	T2 Ch.	T3 Gl.	T4 Ze.	T5 Ei.
Grundlagenforschung							
	TRL 1 - Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potentielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung							
	TRL 2 - Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 - Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 4 - Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Demonstration							
	TRL 5 - Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 6 - Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 7 - Prototypentest in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 8 - Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kommerzialisierung							
	TRL 9 - Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

TRL= Technology Readiness Level

T0: elektrische Dampferzeugung (Querschnittstechnologie), T1: Papier und Pappen, T2: Grundstoffchemie, T3: Glas, Keramik, T4: Zement, Kalk, Ziegel, T5: Eisen & Stahl

Die Einschätzungen in Tab. II-3 basieren auf Literaturangaben und Expertengesprächen zu den Elektrifizierungspotenzialen mit Vertretern ausgewählter energieintensiver Branchen und werden im Folgenden begründet.

T0 - Elektrische Dampferzeugung (Querschnittstechnologie): TRL 7

Elektrische Dampferzeuger im kleinen Leistungsbereich stehen bereits kommerziell zur Verfügung, z. B. für Sterilisatoren in Krankenhäusern oder im produzierenden Gewerbe. Im großen Maßstab, als Ersatz für brennstoffbetriebene Dampfkessel oder Dampfkraftwerke (KWK-Anlagen), werden sie jedoch noch selten kommerziell eingesetzt. Es gibt jedoch z. B. in einem Chemiapark erste positive Erfahrungen mit einem Elektrodenkessel in einer parallel hybriden Dampferzeugungsanlage, der vom

Betreiber als „gut integriert“ und „mit schnellen Ansprechzeiten“ beschrieben wird. Weitere Einsatzbeispiele sind in (Bechem et al. 2015: 116 ff.) dokumentiert.

T1 - Papier und Pappe: TRL 8

Die Papier- und Pappenindustrie weist einen sehr hohen Dampfbedarf auf, der grundsätzlich (aus technischer Sicht) mehr oder weniger vollständig elektrisch bereitgestellt werden könnte (vgl. To). Die hier vorgenommene Einschätzung bezieht sich jedoch auf ein anderes Beispiel, nämlich die *Mikrowellentrocknung* bei der Papierverarbeitung. Sie sorgt für eine selektive, homogene, schonende, schnelle und energieeffiziente Erwärmung mit Tiefenwirkung und ist besonders geeignet bei Trocknungsprozessen. Gründe dafür sind kürzere Trocknungszeiten, geringerer Energieverbrauch und Selbstregeleffekte (Levelling, keine Überhitzung von trocknen Stellen) und somit insgesamt eine höhere Produktqualität sowie ein geringerer Flächenbedarf der Hochfrequenzanlage (bis zu Faktor 10 im Vergleich zur Konvektionstrocknung). Aufgrund dieser Vorteile gibt es bereits erste marktnahe Anwendungen. Das Ausbaupotenzial ist jedoch noch sehr groß.

T2 - Grundstoffchemie: TRL 4

Für die Chemieindustrie gilt, ähnlich wie für die Papierindustrie, dass sie einen relativ hohen Dampfbedarf hat, der - siehe oben - technisch durch Elektrifizierung gedeckt werden könnte. Schwieriger sind jedoch direkte Eingriffe in die Produktionsprozesse selber. Optimal ist ein kontinuierlicher und homogener Prozessbetrieb, der so gefahren werden kann, dass maximale Energieeffizienz erreicht wird bei (gerade noch) Einhaltung der Produktqualität. Je weniger Schwankungen der Prozess aufweist, desto näher kann an das Energie-Maximum heran gefahren werden. Daher ist eine flexibilisierte Fahrweise mit Strom schwierig sowohl hinsichtlich der Energieeffizienz als auch der Produktqualität. Aufgrund dieser Hindernisse wird die Technologieentwicklung auf ein niedriges Niveau eingeschätzt.

T3 - Glas, Keramik: TRL 5 (induktiv / indirekt resistiv) und TRL 9 (konduktiv)

Strom kann in der Glas- und Keramikindustrie sowohl in monovalenten als auch in hybriden Heizsystemen zum Einsatz kommen. Dabei kommen das konduktive (geschmolzenes Glas als elektrischer Leiter = direkte Widerstandsheizung), das induktive (über ein Magnetron) und die Einbringung von elektrischen Heizelementen (indirekte Widerstandsheizung) in Betracht. Die konduktive Erwärmung ist die einzige PtH-Technologie, die in dieser Branche bisher kommerziell angewandt wird (Joint Research Centre (JRC) 2013: 46). Nach wie vor deckt Erdgas mit 85 % den Hauptteil des Energieeinsatzes (BINE 2014).

T4 - Zement, Kalk, Ziegel: TRL 4

Hier wird Bezug genommen auf die Kalzinierung im Kalkofen bzw. die gekoppelte Kalzinierung und Sinterung im Zementofen (Drehrohrofen) bei der Zementherstellung. Grundsätzlich ist auch hier eine Elektrifizierung vorstellbar: entweder durch eine hybride elektrische Luftvorwärmung im bestehenden Systemen (mit Anpassun-

gen) z. B. durch Einblasen elektrisch erhitzter Luft oder durch den direkten Einsatz von Widerstandsheizelementen oder durch eine monovalente Ausführung, die eine komplette Neukonstruktion erfordern würde.

Eine Elektrifizierung würde gewisse Vorteile erbringen. Beispielsweise wird der apparative Aufwand als einfach(er) eingeschätzt, da u. a. keine Zuluft- und Brenngaskonditionierung erforderlich ist. Als Co-Benefit könnten außerdem hochreine CO₂-Ströme als Nebenprodukt der Elektrifizierung in relevanten Mengen - z. B. zur Gas-Synthese mit erneuerbarem Wasserstoff - nutzbar gemacht werden. Angesichts der sehr niedrigen Referenzbrennstoffkosten für die vorwiegend eingesetzten Ersatzbrennstoffe und angesichts der notwendigen Zuführung sehr hoher Energiemengen bzw. Leistungen ist eine solche Elektrifizierung jedoch noch weit ab von einer Kommerzialisierung. Indirekt elektrisch beheizte Drehrohröfen existieren bislang nur im Technikum-Maßstab¹⁶ mit einem Durchsatz von bis zu 0,1 t/h.

T5 - Eisen & Stahl: TRL 9

Bei der Stahlverarbeitung haben sowohl die konduktive als auch die induktive Erwärmung (Schmelzen von Stahl, Gusseisen, Leicht- und Schwermetallen im Tiegel- oder Rinnenofen) eine große Relevanz und einen hohen Entwicklungsstand erreicht. Bei der Sekundärstahlerzeugung (Elektrostahl-Recycling) wird sie als Standardtechnologie eingesetzt. Dadurch wird insgesamt bereits ca. ein Drittel des gesamten Stahls (Primär- und Sekundärstahl) weltweit in Drehstrom- oder Gleichstrom-Lichtbogenöfen geschmolzen (Pfeifer 2013: 308). In der Weiterverarbeitung gibt es jedoch noch deutliches Ausbaupotenzial für elektrische Verfahren.

Teilkriterium 2.2 Technisches und wirtschaftliches F&E-Risiko

Die technischen und wirtschaftlichen F&E-Risiken werden in Tab. II-4 auf der Technologiefeld-Ebene eingeschätzt.

Tab. II-4 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld Power-to-Heat

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Das technische Entwicklungsrisiko wird (über die Breite aller PtH-Technologien) als eher gering angesehen, da die Technologien an sich bereits weit entwickelt sind und - wie in Kapitel 3.1 beschrieben - in verschiedenen Anwendungen auch kommerziell zum Einsatz kommen. In einigen Anwendungsfällen, beispielsweise in der Grundstoffchemie oder bei der Klinker- und Zementherstellung, sind jedoch möglicher-

¹⁶

vgl. www.ibu-tec.de/versuche-scale-up/drehrohröfen/versuchsanlagen.html

weise auch höhere technische Risiken zu erwarten, da dort z. T. Prozesse und Apparate (z. B. Drehrohröfen) komplett neu entwickelt und konstruiert werden müssten.

Das wirtschaftliche Risiko wird grundsätzlich als eher hoch angesehen, da von derzeit eher preisgünstigen Energieträgern (Erdgas, Kohle, Ersatzbrennstoffe) auf einen teureren Energieträger (Strom) umgestellt werden müsste. Dies gilt insbesondere für monovalent betriebene Anlagen, die nicht dauerhaft von günstigem Überschussstrom profitieren können. Wenn dadurch höhere Betriebskosten in Kauf genommen werden müssten, erhöht sich der Druck auf eine kostengünstige Entwicklung und Investition in PtH-Anlagen. Inwieweit die wirtschaftliche Risikobewertung in Tab. II-4 zutrifft, ist unter anderem vom Ausbau erneuerbarer Stromquellen und der zukünftigen Entwicklung des Strommarktdesigns abhängig.

Teilkriterium 2.3 Rohstoffrisiken

Aufgrund der Breite der einsetzbaren PtH-Technologien kann hier keine abschließende Bewertung hinsichtlich des Einsatzes kritischer Rohstoffe vorgenommen werden. Studien, die dieses Themenfeld speziell für PtH-Technologien beleuchten, sind nicht bekannt. Grundsätzlich erfordern jedoch strombasierte Technologien einen mehr oder weniger hohen Einsatz an stromleitenden Metallen. Insbesondere Kupfer kommt in Spulen (z. B. bei Induktionsöfen) in relevanten Mengen zum Einsatz. Seltene Metalle wie Wolfram oder Tantal werden beispielsweise in einer Elektronenstrahlkanone benötigt (Pfeifer 2013: 323).

Tab. II-5 Einsatz kritischer Rohstoffe im Technologiefeld Power-to-Heat (Auswahl)

Kritischer Rohstoff	Substitutionsmöglichkeit	Rezyklierbarkeit
Kupfer (Cu)	keine (ggf. Al)	ja
Wolfram (W)	Tantal (Ta)	ja
Tantal (Ta)	Wolfram (W)	ja

4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes

4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Die im Rahmen der Technologieberichte ausgewählten Szenarien gehen nicht explizit auf Potenziale industrieller Power-to-Heat-Technologien für Prozesswärme ein¹⁷. Daher wird ein alternatives Vorgehen gewählt und relevante Ergebnisse ausgewählter Elektrifizierungs-Studien wiedergegeben sowie eigene Potenzialabschätzungen für energieintensive Branchen in Deutschland vorgenommen. Aufgrund der wenigen verfügbaren Literatur und des erheblichen Aufwands zur Identifikation der Potenziale (zahlreiche PtH-Technologien für unterschiedliche Branchen, Prozesse und Produkte) kann eine Betrachtung internationaler Potenziale im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Dies sollte jedoch Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten sein.

Potenzialabschätzungen aus der Literatur

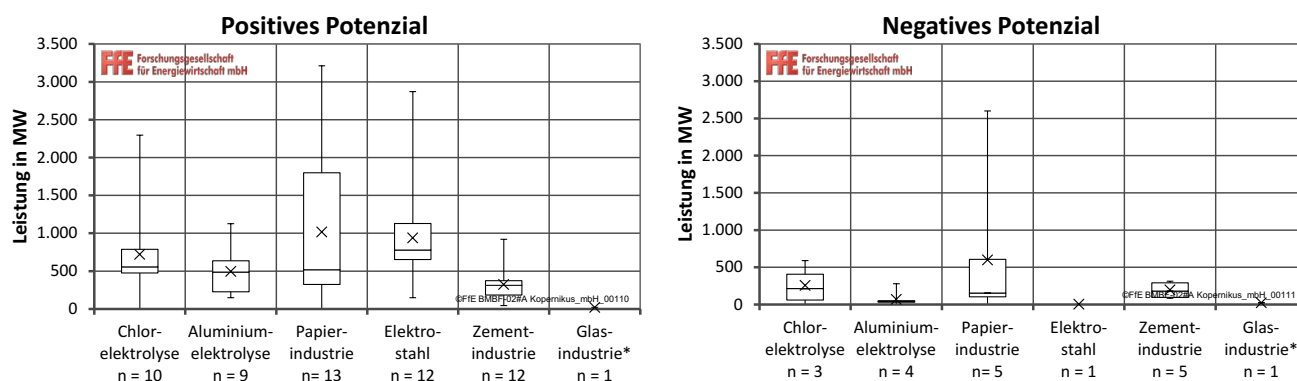
Es gibt bisher nur wenige Studien in der Literatur, die sich systematisch mit den Elektrifizierungspotenzialen industrieller Prozesswärme beschäftigten. In (Gruber et al. 2015: 14 f.) wird - ausgehend von 534 TWh Endenergie für die industrielle Wärmeerzeugung im Jahr 2012 - im Szenario *Wärmepumpe & elektrothermische Verfahren* ein Elektrifizierungspotenzial von ca. 180 TWh/a angegeben. Dies entspräche bei 6.200 Volllaststunden pro Jahr einer mittleren Elektrifizierungsleistung von etwa 29 GW und einer Erhöhung des Gesamtstromverbrauchs von 520 TWh (in 2012) um 35 %.

Quaschnig schätzt - unter Einbeziehung von Effizienzmaßnahmen wie Wärmerückgewinnung - den zusätzlichen Strombedarf für die Dekarbonisierung industrieller und gewerblicher Prozesswärme durch Elektrifizierung bis zum Jahr 2040 in einer Größenordnung von 250 TWh ab (Quaschnig 2016: 19).

Viele der vorliegenden Studien beschäftigen sich zunächst nur mit einem Teilaspekt der Elektrifizierung, nämlich dem Flexibilisierungspotenzial von PtH-Technologien. Solche Technologien bzw. Ansätze sind in der Regel bereits näher an der Wirtschaftlichkeit, da mit ihnen Zusatz Erlöse z. B. am Regelle Energiemarkt erzielt werden können. Abb. II-2 macht deutlich, wie groß die Bandbreite und somit die Unsicherheiten der in einer Metaanalyse zusammengetragenen Potenziale für verschiedene Branchen sind.

¹⁷

Ausnahme ist die Berücksichtigung von industriellen Hochtemperatur-Wärmepumpen (bis 140 °C), die jedoch in einem anderen Technologiebericht behandelt werden. In dem KS95-Szenario wird für diese z. B. ein Potenzial von 11 TWh für das Jahr 2050 ausgewiesen (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015).



n = Anzahl der ausgewerteten Studien / * nur Behälterglas-Industrie

Abb. II-2 Metaanalyse zur Identifizierung der Bandbreite der Potenziale an positiver (links) und negativer (rechts) Regelenergiebereitstellung für verschiedene industrielle Branchen

Quelle: von Roon und Dufta (2016: 6)

Eine der wenigen verfügbaren Literaturquellen, die sich mit einer vollständigen Elektrifizierung aller Sektoren (Haushalte, GHD, Industrie und Verkehr) detaillierter auseinandersetzen, ist die Masterarbeit von Guminski (Guminski 2015) und ein in diesem Kontext veröffentlichtes Tagungspaper (Guminski und von Roon 2017).

In seiner Masterarbeit verfolgt Guminski den Ansatz einer vollständigen Elektrifizierung aller Sektoren in Deutschland zwischen 2015 und 2050. Insgesamt identifiziert er ein Elektrifizierungspotenzial von 1.880 TWh. Dies entspricht rund 74 % des Endenergieverbrauch von 2.540 TWh im Jahr 2013 (Guminski und von Roon 2017: 2 f., 10 ff.).

Für den industriellen Sektor leitet er aus dem gesamten Endenergiebedarf von 723 TWh (Stand 2013) ein *theoretisches Elektrifizierungspotenzial* von 476 TWh ab (siehe Abb. II-3). Dies entspricht einer Elektrifizierungsrate von rund 66 %. Davon entfallen 414 TWh (87 %) auf *Prozesswärme*, die übrigen 62 TWh (13 %) auf Raumheizung und Warmwasser. 58 TWh (12 % von 476 TWh) werden über elektrifizierte *Fernwärme* (Warmwasser und Dampf) und der Rest direkt elektrisch bereitgestellt.

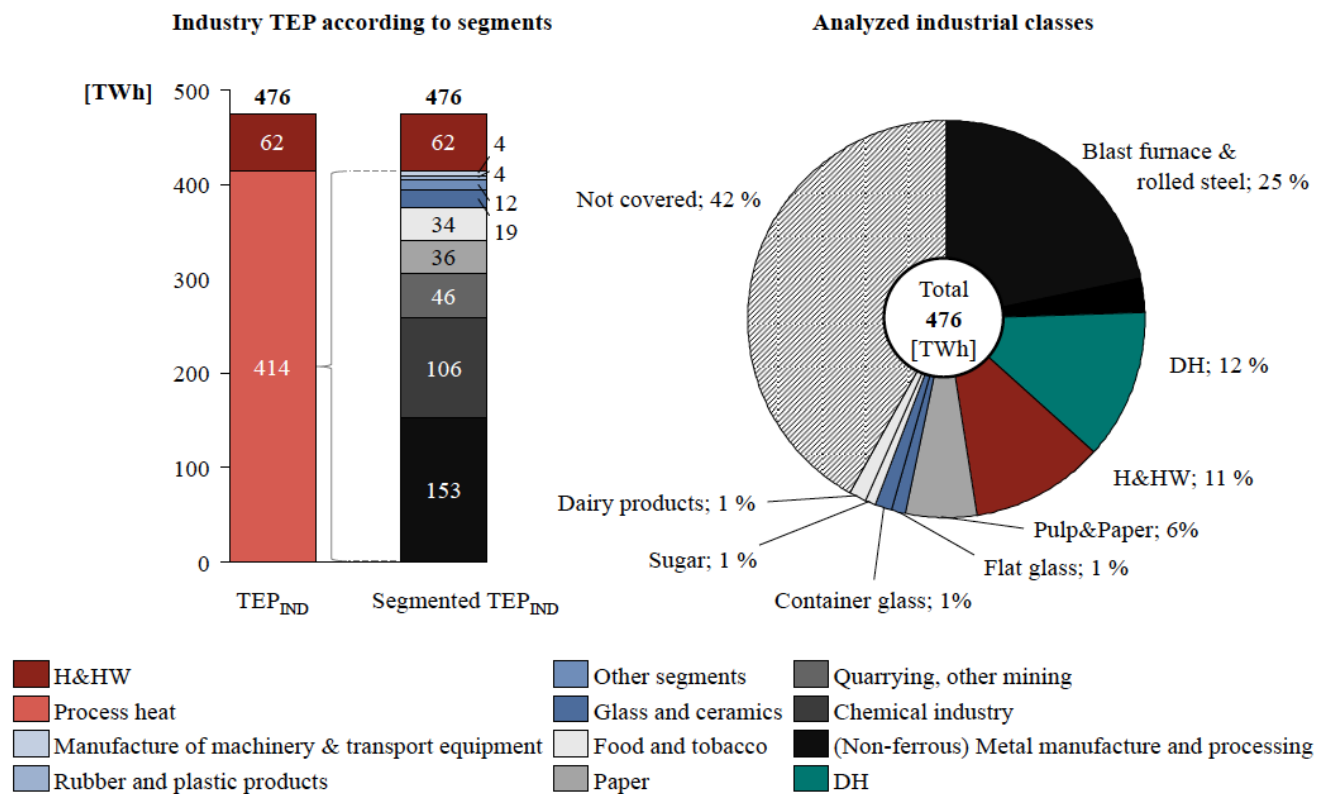


Abb. II-3 Theoretische industrielle Elektrifizierungspotenziale (TEP), differenziert nach Industriebranchen

Quelle: Guminski (2015: 39)

Für einzelne Segmente aus dem Nieder- und Mitteltemperaturbereich (bis 240 °C) sowie aus dem Hochtemperaturbereich (über 1.000 °C) werden konkret aus den theoretischen Potenzialen die technisch realisierbaren Potenziale abgeleitet (vgl. Tab. II-6). Für die Segmente aus der ersten Kategorie (Raumwärme & Warmwasser, Papier, Zucker und Milchprodukte) sind die Potenziale vollständig elektrifizierbar, d. h. das theoretische ist mit dem technischen Potenzial identisch. In der zweiten Kategorie gilt dies nur für die Glasindustrie (Flach- und Behälterglas). Bei der Stahlindustrie (Hochofen und Warmwalzen) reduziert sich das Potenzial von rund 120 TWh auf 52 TWh, da zumindest die Primärstahlherstellung prozesstechnisch auf fossile Rohstoffe angewiesen ist und somit in der Praxis nicht elektrifizierbar ist. Insgesamt wird für die sieben untersuchten Branchen bzw. Segmente ein *technisches Elektrifizierungspotenzial* von 153 TWh/a ermittelt.

Tab. II-6 Technische Elektrifizierungspotenziale industrieller Branchen für unterschiedliche Temperaturbereiche

Klasse	Elektrisches System	Referenzsystem	Technisches Elektrifizierungs-Potenzial [TWh]
Nieder- und Mitteltemperatur (bis 240 °C)			88,6
Raumwärme & Warmwasser	Industrie-WP (Sole)	ND-Gaskessel	51
Papier	Industrie-WP (Sole)	HD-Gaskessel	27
Zucker	Elektrodenkessel	HD-Gaskessel	4,5
Milchprodukte	Elektrodenkessel	HD-Gaskessel	6,1
Hochtemperatur (> 1.000 °C)			64,6
Stahl	Elektrolichtbogenofen	Hochofen	52
Flachglas	Elektr. Glasofen	Flachglasofen	6,0
Behälterglas	Elektr. Glasofen	Behälterglasofen	6,6
Summe			153,2

Quelle: Guminski (2015: 41 ff.), eigene Übersetzung und Ergänzungen

In einer weiteren Arbeit wird ebenfalls eine Ableitung der Elektrifizierungspotenziale im Jahr 2050 für verschiedene, nachfolgend genannte Branchen vorgenommen: Chlor, Ammoniak, Glas, Stahl, Primär- und Sekundäraluminium, Primär- und Sekundärkupfer, Primär-Zink, Lebensmittel, Druckereien, Textilindustrie, Fahrzeugbau, Gießereien, Kunststoffverarbeitung, Futtermittel, Papier und Sonstige Branchen. In der Summe wird ein Potenzial von 201,4 TWh für Hochtemperaturprozesswärme und weitere 70,6 TWh für den Einsatz von Wärmepumpen (bis 140 °C) identifiziert (Bechem et al. 2015: 120). Das korrespondierende DSM-Potenzial wird mit 16.650 MW_{el} angegeben.

Eigene Potenzialabschätzungen für Deutschland

Um ein möglichst vollständiges Bild über die Elektrifizierungspotenziale für alle relevanten energieintensiven Branchen zu erhalten, wurden eigene Potenzialabschätzungen vorgenommen. Dazu wurden zunächst die Kapazitäten und Produktionsmengen (Stand: 2015) sowie die spezifischen Energiebedarfe für energieintensive Prozesse in Deutschland für Strom, Dampf, Brennstoffe einzeln ermittelt. Als Basis dient eine eigene Datenbank mit 105 unterschiedlichen Produktionsprozessen und 970 erfassten Einzelanlagen an 457 Standorten in Deutschland, die eine Datengrundlage des Energiesystemmodells WISEE des Wuppertal Instituts bildet.

Modellierung

Der Gesamtverbrauch der Industrie (inkl. Raffinerien und Kokereien) betrug im Bilanzjahr 2014 für Strom 235 TWh und für Brennstoffe und Dampf (aggregiert)

560 TWh (AGEB 2016). Daraus wurde folgende Auswahl an acht energieintensiven Branchen bottom-up modelliert:

- Papier und Pappe
- Raffinerien
- 59 Prozesse der Grundstoffchemie
- Glas (inkl. Glasfasern und Steinwolle)
- Zement
- Eisen & Stahl
- NE-Metalle
- Eisengießereien

Die Modellierung deckt einen Bedarf an 84 TWh Strom (36 %), 235 TWh Brennstoffen und 91 TWh Dampf (zusammen 58 %) ab. Bei den Brennstoffen ist der Reduktionsmittelbedarf enthalten, jedoch nicht der Brennstoffeinsatz in Industriekraftwerken (IKW). Beim Dampf ist der Bezug aus IKW berücksichtigt und eine Bilanzierung von Ein- und Ausspeisungen von Dampf an einzelnen Standorten vorgenommen worden.

Technisches Substitutionspotenzial

Um das technische Elektrifizierungspotenzial zu ermitteln, wurden diejenigen Prozesse, die nicht für eine Elektrifizierung geeignet sind (bzw. einen kompletten Prozesswechsel erfordern würden) ausgeschlossen. Dazu gehört beispielsweise der Einsatz von Energieträgern als Reduktionsmittel. Des weiteren wurden brennstoffintensive Prozesse ausgeschlossen, bei denen in typischer Konfiguration prozessbedingt Brenngasüberschüsse vorliegen (Steam Cracker, Raffinerien, integrierte Hochöfenwerke, vgl. Abb. II-4 – bei den in dieser Grafik ausgewiesenen Potenzialen wurde keine standortscharfe Bilanzierung von Quellen und Senken vorgenommen, so dass diese nicht mit den Gesamtpotenzialen direkt vergleichbar sind).

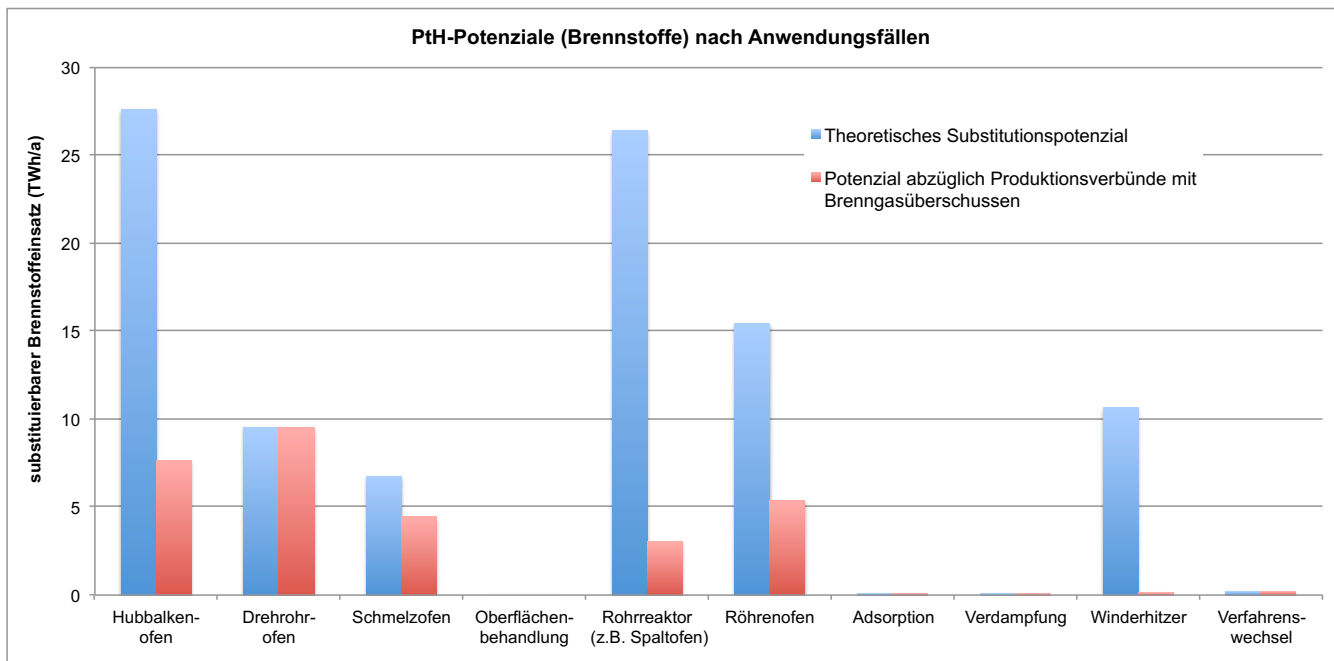


Abb. II-4 Reduktion des PtH-Potenzials durch Ausschluss von Produktionsverbünden mit Brenngasüberschüssen

Mit dieser Vorgehensweise ergibt sich ein technisches (statisches) Elektrifizierungspotenzial (siehe Tab. II-7) für

- *Brennstoffe* von 59 TWh (= 25 % des modellierten Bedarfs) mit typischen Schwerpunkten in den Branchen:

- Metallerzeugung und Bearbeitung
- Einzelne Prozesse der Grundstoffchemie
- Zementindustrie
- Floatglas-Anlagen

sowie für

Dampf von 91 TWh (= 100 % des modellierten Bedarfs) mit typischen Schwerpunkten in den Branchen:

- Chemische Industrie
- Raffinerien
- Papier- und Zellstoffindustrie.

Tab. II-7 Übersicht über den tatsächlichen und den (teil-)modellierten industriellen Energiebedarf in TWh/a für Strom, Brennstoffe und Dampf und daraus abgeleitete technische Elektrifizierungspotenziale

Energieträger	Verbrauch gesamter Industriesektor 2014 (nach AGEB)	WI-Modellierung (ausgewählte Prozesse)	Technisches Elektrifizierungs-Potenzial [TWh]
Strom	235	84	-
Brennstoffe	560 (aggregiert)	239	59
Dampf		91	91
Summe	795	414	150

Quelle: eigene Berechnungen, Verbrauchswerte nach AGEB (2016)

Die Teilpotenziale für die einzelnen modellierten Branchen können Tab. II-8 entnommen werden. Sie betragen für Dampf bis zu 41,6 TWh (Papier und Pappe) und für Brennstoffe bis zu 21,5 TWh (Zement, Kalk und Ziegel).

Tab. II-8 Übersicht über technische Elektrifizierungspotenziale nach Branchen

Abgrenzung AGEB	Abgrenzung WI	Endenergieeinsatz 2014 nach AGEB *)	WI-Modellierung		Technische Elektrifizierungspotenziale				
			Dampf	Brennstoff	Dampf		Brennstoff		Summe
			TWh	TWh	TWh	%	TWh	%	TWh
Papier und Pappe	Papier und Pappe	43,3	41,6	0,0	41,6	100	0,0	0	41,6
Raffinerien	Raffinerien	67,1	10,8	46,3	10,8	100	1,6	4	12,4
Grundstoffchemie	59 Prozesse der Grundstoffchemie	103,5	34,5	24,2	34,5	100	6,9	28	41,4
Glas, Keramik	Glas (inkl. Glasfasern und Steinwolle)	18,7	0,0	14,7	0,0	0	11,2	76	11,2
Zement, Kalk, Ziegel	Zement	45,7	0,0	21,5	0,0	0	21,5	100	21,5
Eisen & Stahl	Eisen & Stahl	137,8	3,9	123,5	3,9	100	8,4	7	12,3
NE-Metalle & Eisengießereien	NE-Metalle	13,7	0,0	3,9	0,0	100	3,9	100	3,9
	Eisengießereien		0,0	5,3	0,0	0	5,3	100	5,3
Summe		429,7	90,8	239,4	90,8		58,8		149,6

*) inkl. Brennstoffeinsatz zur Erzeugung von Dampf in Dampfkesseln und KWK-Anlagen

Quelle: eigene Berechnungen, Verbrauchswerte nach AGEB (2016)

Der Vergleich des ermittelten *technischen Elektrifizierungspotenzials* von insgesamt rund 150 TWh (von 414 TWh modellierter Endenergie des Jahres 2014) für die ausgewählten industriellen Prozesse mit den weiter oben dargestellten Potenzialab-

schätzungen aus der Literatur zeigt, dass die eigenen Berechnungen nahe an dem von *Guminski* ausgewiesenen Wert von *153 TWh* liegen (siehe Tab. II-6, bezogen auf einen gesamten Endenergiebedarf von *723 TWh* im Jahr 2013). Das von *Gruber et al.* im Szenario „Wärmepumpe & elektrothermische Verfahren“ hergeleitete Elektrifizierungspotenzial von ca. *180 TWh* liegt 20 % höher. Es ist bezogen auf *534 TWh* Endenergie für die industrielle Wärmeerzeugung im Jahr 2012. Bechem et al. leiten ein Elektrifizierungspotenzial für das Jahr 2050 für verschiedene industrielle Branchen von insgesamt *201 TWh* für Hochtemperaturprozesswärme (und weitere *70,6 TWh* für den Einsatz von Wärmepumpen bis 140 °C) ab. Das höchste Potenzial nennt *Quaschnig* mit einem zusätzlichen Strombedarf für die Dekarbonisierung industrieller und gewerblicher Prozesswärme durch Elektrifizierung bis zum Jahr 2040 in einer Größenordnung von *250 TWh*. Hierbei handelt es sich jedoch eher um eine grobe Abschätzung als eine fundierte, bottom-up vorgenommene Branchen- oder Prozessanalyse.

Die Unterschiede in den Potenzialberechnungen bzw. -abschätzungen liegen insbesondere in der Fokussierung auf bestimmte Branchen bzw. (z. B. energieintensive) Prozesse¹⁸. Weitere Gründe für Abweichungen liegen in der unterschiedlichen Detailtiefe sowie in unterschiedlichen Basis- und Endjahren.

Abb. II-5 zeigt die räumliche Verteilung der modellierten industriellen Energieverbräuche sowie die daraus abgeleiteten technischen Elektrifizierungspotenziale für Dampf und Hochtemperatur-Prozesswärme.

¹⁸

Eine einfache - und daher mit Unsicherheiten verbundene - Hochrechnung der mit dem WISEE-Modell ermittelten Potenziale auf *alle* industriellen Prozesse ergäbe ein Gesamtpotenzial von $150/(239+91)*560 \text{ TWh} = 254 \text{ TWh}$.

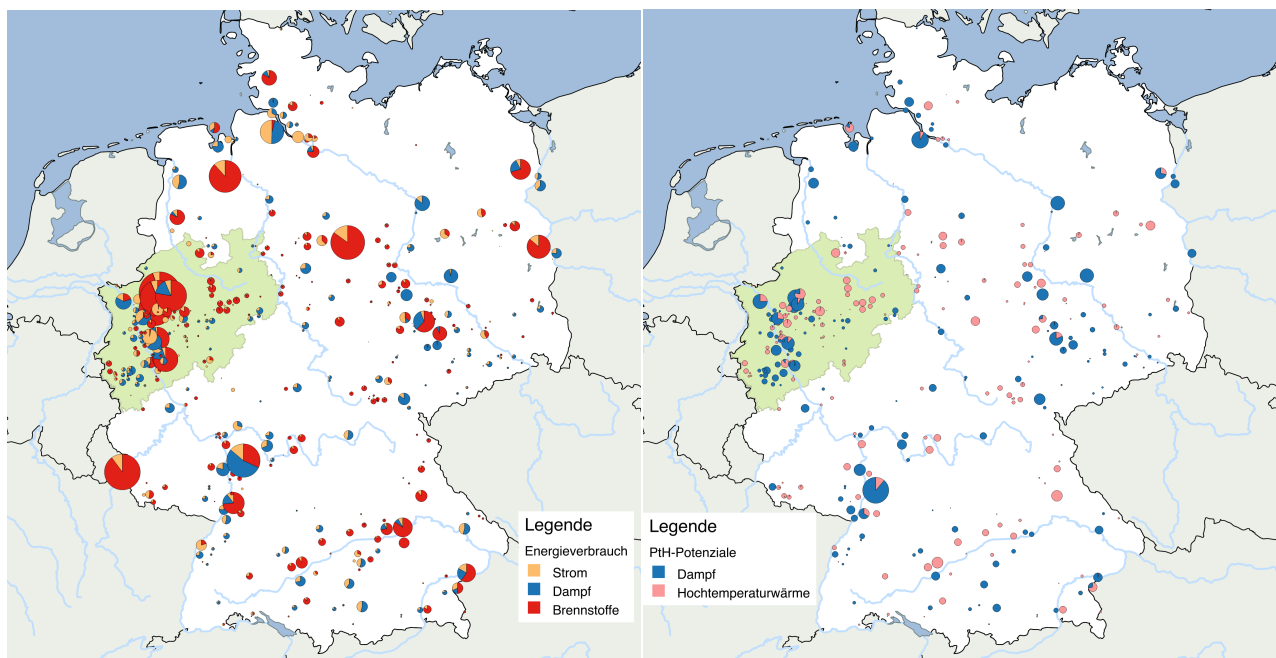


Abb. II-5 Räumliche Verteilung der modellierten industriellen Energieverbräuche (links) sowie daraus abgeleitete technische Elektrifizierungspotenziale für Dampf und Hochtemperatur-Prozesswärme (rechts)

Marktpotenziale

Aus technischer Sicht am einfachsten ist die Substitution von Brennstoffen zur Dampferzeugung (Gesamtpotenzial 91 TWh Endenergie). Aufgrund der hohen Unsicherheiten und der notwendigen branchen- bzw. prozessdetaillierten Untersuchungstiefe für eine verlässliche Beurteilung möglicher Entwicklungen der übrigen Brennstoff-Substitutionspotenziale (59 TWh) beschränken sich die nachfolgenden Untersuchungen zu den Marktpotenzialen auf die Elektrifizierung von Dampf. Unter der Annahme, dass in den kommenden Jahrzehnten beim Zubau Marktanteile von 10 % bis 60 % (in einem nationalen 80 %-Klimaschutz-Szenario) bzw. 20 % bis 100 % (in einem nationalen 95 %-Klimaschutz-Szenario) erreicht werden können, ergeben sich ab 2020 die in Tab. II-9 gezeigten Zubaupotenziale von 5 bis 27 TWh (DE_80 %) bzw. 9 bis 45 TWh (DE_95 %) pro Dekade. Bei dieser Berechnung wurde eine Lebensdauer der Dampferzeuger von 20 Jahren unterstellt. Bezogen auf das Gesamtpotenzial von 91 TWh bedeutet dies in der Summe eine mittlere jährliche Ersatzinvestition an konventionellen und elektrischen Anlagen mit einer Dampferzeugung von 4,54 TWh/a.

Tab. II-9 Analyse des nationalen Marktpotenzials für das Technologiefeld Power-to-Heat am Beispiel elektrischer Dampferzeuger (TWh Endenergie Dampf)

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Anteil Zubau (Annahme)	Zubau	Anteil Zubau (Annahme)	Zubau
Einheit	%	TWh	%	TWh
2014 - 2020	0	0	0	0
2021 - 2030	10	5	20	9
2031 - 2040	30	14	70	32
2041 - 2050	60	27	100	45

Ausgehend von einem konventionellem Bestand von 91 TWh fossiler Dampferzeuger (Elektrifizierungsgrad 0 %) in 2020 ergeben sich mit Hilfe der Zubauwerte aus Tab. II-9 die in Tab. II-10 dargestellten Bestände elektrischer Dampferzeuger für die jeweiligen Stützjahre. Im Zieljahr 2050 könnten demnach im DE_80 %-Szenario 45 % (41 TWh) und im DE_95 %-Szenario 85 % (77 TWh) der technischen Dampfpotenziale realisiert werden.

Tab. II-10 Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für das Technologiefeld Power-to-Heat am Beispiel elektrischer Dampferzeuger (absolute Werte der Dampferzeugung aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	TWh	Ausschöpfung Potenzial in %	TWh	Ausschöpfung Potenzial in %
2020	0	0	0	0
2030	5	5	9	10
2040	18	20	41	45
2050	41	45	77	85

Verifizierung des Marktpotenzials mittels implizierter Wachstumsraten (CAGR)

Zur Plausibilitätsprüfung der oben angegebenen Marktpenetrationsraten wird die mittlere jährliche Wachstumsrate CAGR (engl. compound annual growth rate) verwendet:

$$\text{CAGR}(t, t') = \left(\frac{N(t')}{N(t)} \right)^{1/(t'-t)} - 1$$

mit jährlichen Neuinstallationen N im Startjahr t und im Endjahr t' . Als Jahr der voraussichtlichen Markteinführung (Startjahr) wird das Jahr 2020 gewählt, als Endjahr im ersten Fall 2030 und im zweiten Fall 2050.

Für die erste Dekade nach der Markteinführung ergibt sich somit eine mittlere jährliche Wachstumsrate von 11,6 % für das 80 %-Szenario und 13,3 % für das 95 %-Szenario. In den beiden darauffolgenden Dekaden schwächt sich die Wachstumsrate auf 3,5 % pro Jahr bzw. 1,8 % pro Jahr ab.

Tab. II-11 Mittlere jährliche Wachstumsrate für das Technologiefeld Power-to-Heat am Beispiel elektrischer Dampferzeuger

Zeitraum	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
	CAGR in %/a	CAGR in %/a
2020 - 2030	11,6	13,3
2030 - 2050	3,5	1,8

4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionszielen

Basierend auf der in Tab. II-10 genannten Bandbreite des nationalen PtH-Einsatzes am Beispiel elektrischer Dampferzeuger werden in Tab. II-12 die daraus resultierenden jährlich vermiedenen Treibhausgas-Emissionen (THG) ausgewiesen. Dabei wurden die spezifischen THG-Emissionsfaktoren für den Strommix der beiden nationalen Klimaschutzszenarien (Tab. II-13) aus den Quotienten der absoluten Emissionsmengen und der Nettostromerzeugung hergeleitet. Als Referenztechnologie wurde ein Erdgaskessel mit 90 % Wirkungsgrad (EU 2016: 58) und ein spezifischer Emissionsfaktor für die Verbrennung von Erdgas von 55,944 kg/TJ (201,4 g/kWh) angenommen (UBA 2016: 22). Für die Dampferzeugung in einem Elektrodenkessel wird ein Wirkungsgrad von 99 % angesetzt (Guminski 2015: 69).

Die negativen Werte für das Jahr 2030 (grau hinterlegt) bedeuten, dass mindestens bis zu diesem Zeitpunkt durch eine *monovalente Elektrifizierung* der Dampferzeugung Mehremissionen entstehen (0,2 bis 0,6 Mio. t/a). Dies liegt an den - verglichen mit Erdgas - spezifisch höheren THG-Emissionen der Stromerzeugung, die auch nicht durch die höheren Kesselwirkungsgrade kompensiert werden können. Im Jahr 2040 herrscht hinsichtlich der THG im 80 %-Szenario Parität zwischen der Dampferzeugung aus Strom und Erdgas, während im 95 %-Szenario bereits eine Emissionsminderung von 3,8 Mio. t/a CO₂-Äquivalente erzielt werden kann. Dies unterstreicht noch einmal die wichtige Tatsache, dass hohe erneuerbare Ausbauziele im Stromsektor Voraussetzung für eine sinnvolle und früh einsetzende Elektrifizierungsstrategie sind. Im Jahr 2050 können - unter der Annahme eines entwickelten PtH-Potenzials von 77 TWh/a - maximal Einsparungen von 15,9 Mio. t/a erreicht werden. Würde bis 2050 das gesamte technische Potenzial für industriellen Prozessdampf von 90,1 TWh/a realisiert, entspräche dies einer Einsparung von 18,7 Mio. t/a. Zusätzlich wäre bei vollständiger Realisierung auch des prozesstechni-

schen Brennstoff-Substitutionspotenzials von 50,9 TWh/a (vgl. Tab. II-7) eine weitere Reduktion von maximal 10,8 Mio. t/a möglich¹⁹.

Tab. II-12 Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Power-to-Heat (elektrischer Dampferzeuger) in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (Erdgaskessel)

Mio. t CO ₂ -äq./a	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	vs. Strommix (monovalent)	vs. EE-Mix ^{*)} (hybrid)	vs. Strommix (monovalent)	vs. EE-Mix ^{*)} (hybrid)
2020	0,0	0,0	0,0	0,0
2030	- 0,6	1,0	- 0,2	2,0
2040	0,0	4,1	3,8	9,2
2050	5,9	9,2	15,9	17,3

^{*)} Theoretische Einsparungen unter der Voraussetzung ausreichend verfügbarer EE-Überschussstrommengen

Grau hinterlegte Felder: negative Werte (Mehremissionen)

Für den Fall einer *hybriden Elektrifizierung*, die sich flexibel alleine aus erneuerbaren Stromüberschüssen speist, werden alternativ die Emissionswerte für den EE-Mix auf (annähernd) Null gesetzt. Dadurch ergeben sich bereits im Jahr 2030 THG-Einsparungen von 1 bis 2 Mio. t/a und im Jahr 2050 maximale Einsparungen von 17,3 Mio. t/a (3. und 5. Spalte in Tab. II-12). Zu beachten ist jedoch, dass dies theoretische Werte sind, da im Rahmen dieses Technologieberichtes nicht geprüft werden konnte, ob in den jeweiligen Jahren überhaupt ausreichend EE-Stromüberschüsse zur Verfügung ständen, die andernfalls abgeregelt werden müssten.

Tab. II-13 Spezifische THG-Emissionsfaktoren für den Strommix

CO ₂ -äq	DE_80 %-Strommix	DE_95 %-Strommix
	g/kWh	g/kWh
2020	464	428
2030	361	240
2040	221	130
2050	79	17

Quelle: eigene Berechnungen mit Emissionsdaten aus Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015)

¹⁹

Hier wurde vereinfachend und konservativ zugrunde gelegt, dass für die elektrischen Ersatzprozesse die gleichen Wirkungsgrade wie für die fossil basierten Referenzprozesse gelten. Inwieweit das technische Potenzial jedoch tatsächlich umsetzbar ist, müsste für die einzelnen Branchen und Prozesse noch vertiefend analysiert werden.

4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz

Teilkriterium 5.1 Energieeffizienz

Die Vorgehensweise zur Berechnung der Energieeinsparung durch die Elektrifizierung der Dampferzeugung ist prinzipiell die gleiche wie in Kapitel 4.2 für die Herleitung der THG-Einsparungen beschrieben. Im Unterschied dazu werden jedoch anstelle der spezifischen Emissionsfaktoren die Primärenergiefaktoren für den Strommix bzw. für Erdgas (Tab. II-15) mit den jeweiligen Strom- (Elektrifizierung) bzw. Erdgasmengen (Referenz) multipliziert. Da die Wirkungsgradverluste in der Vorkette der Stromerzeugung deutlich höher sind als in der Vorkette zur Bereitstellung von Erdgas, führt die monovalente Elektrifizierung in allen Stützjahren und in beiden Szenarien zu einem Mehrverbrauch an Primärenergie von bis zu 28,2 PJ (80 %-Szenario im Jahr 2050, grau hinterlegte Werte). Lediglich im 95 %-Szenario ist zumindest - trotz zunehmender elektrischer Dampferzeuger - ein Rückgang der Mehrverbräuche von 25,3 PJ in 2040 auf 8,4 PJ in 2050 zu erkennen. Dieser Rückgang ist auf die hohen EE-Anteile in dem ambitionierteren Klimaschutzszenario zurückzuführen²⁰. Im Fall der hybriden Elektrifizierung ergeben sich im Jahr 2050 - unter der Annahme eines 100 %-igen Strombezugs aus erneuerbaren Quellen - Primärenergieeinsparungen von 31,2 bis 59,0 PJ/a.

Tab. II-14 Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch Power-to-Heat (elektrischer Dampferzeuger) in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (Erdgaskessel)

PJ/a	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	vs. Strommix (monovalent)	vs. EE-Mix* (hybrid)	vs. Strommix (monovalent)	vs. EE-Mix* (hybrid)
2020	0	0,0	0	0,0
2030	- 11,1	3,5	- 20,2	6,9
2040	- 22,5	13,9	- 25,3	31,2
2050	- 28,2	31,2	- 8,4	59,0

* Theoretische Einsparungen unter der Voraussetzung ausreichend verfügbarer EE-Überschussstrommengen!

Grau hinterlegte Felder: negative Werte (Mehrverbrauch)

²⁰

Für eine fast vollständige Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien konvergiert der Primärenergiefaktor gegen 1.

Tab. II-15 Primärenergiefaktoren (PEF) für den Strommix und für Erdgas in den Klimaschutzszenarien

PEF	DE_80 %- Strommix	DE_95 %- Strommix	100 %-EE- Strommix	Erdgas
	kWh/kWh	kWh/kWh	kWh/kWh	kWh/kWh
2020	2,35	2,34	1,0	1,1
2030	1,88	1,82	1,0	1,1
2040	1,55	1,38	1,0	1,1
2050	1,40	1,24	1,0	1,1

4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz

Eine detaillierte Kostenanalyse kann im Rahmen dieses Technologieberichtes für PtH nicht durchgeführt werden, da nur wenige oder keine belastbaren Daten zu PtH-Technologien für Prozesswärme in den ausgewählten Klimaschutz-Szenarien²¹ vorliegen, diese Technologien individuell branchen- und produktspezifisch untersucht werden müssten und sie sich in der industriellen Anwendung grundsätzlich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden. Es wird hier daher nur auf entsprechende Literatur verwiesen, welche Angaben zu Kosten oder Differenzkosten macht. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass in der Regel bei hybrider und / oder flexibilisierter Betriebsweise die Kapitalkosten höher und umgekehrt die Betriebskosten - durch Bezug von günstigem Überschussstrom - niedriger ausfallen.

Guminski gibt in seiner Dissertationsarbeit Differenzkosten in ct/kWh für die Elektrifizierung von Prozesswärme in verschiedenen in Kapitel 4.1 bereits beispielhaft beschriebenen Industriesegmenten an (vgl. dort Abb. II-3 auf S. 72 und Tab. II-6 auf S. 73). Die Differenzkosten sind nur im Fall der Wärmepumpe negativ – d. h. man würde damit Kosteneinsparungen erzielen. In allen übrigen untersuchten Anwendungen liegen Mehrkosten gegenüber der fossilen Referenztechnologie vor, in einer Bandbreite von 2 bis 9 ct/kWh (siehe Abb. II-6). Die zugrunde liegenden Annahmen für die spezifischen Investitionskosten sind im Anhang der Arbeit dokumentiert (Guminski 2015: 68 ff.).

²¹

Ausnahme: Haushalts- und Industrie-Wärmepumpen, die jedoch - wie in Kapitel II1.1 beschrieben - in anderen Technologieberichten abgehandelt werden.

Specific differential costs of electrification [ct/kWh]

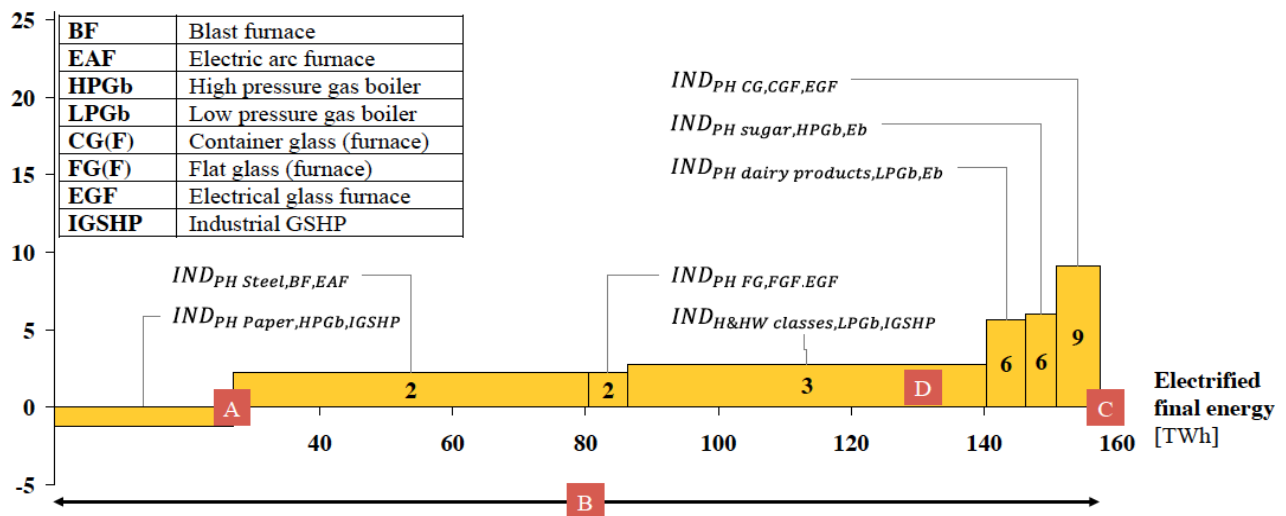


Abb. II-6 Kosten-Potenzial-Kurve für spezifische Differenzkosten der Elektrifizierung von Prozesswärme für die Industriesegmente Papier, Stahl, Flachglas, Raumwärme & Warmwasser, Milchprodukte, Zucker und Behälterglas (v.l.n.r.) in 2050

Quelle: Guminski (2015: 47)

4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung

Grundsätzlich sind deutsche Unternehmen im Bereich Anlagenbau (z. B. Kesselbau, produktionstechnische Anlagen) gut aufgestellt, so dass zu erwarten ist, dass der nationale und/oder internationale Ausbau des betrachteten Technologiefeldes einen relevanten Beitrag zur inländischen Wertschöpfung leisten kann. Bei diesem Kriterium können jedoch aus den in Kapitel 4.4

Kriterium 6: Kosteneffizienz) genannten Gründen zum jetzigen Zeitpunkt keine belastbare quantitativen Aussagen getroffen werden. Insbesondere zur Erfassung des Wertschöpfungspotenzials der individuell erforderlichen prozess- und branchentechnischen PtH-Lösungen wären dazu eigene Studien erforderlich.

4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich

Teilkriterium 8.1 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie

Der Status der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefeldes „Power-to-Heat“ wird grundsätzlich als wettbewerbsfähig angesehen (Tab. II-16). Vertiefende Aussagen zu diesem Kriterium können für das technologisch sehr disperse Technologiefeld im Rahmen dieses Technologieberichtes jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht belastbar getroffen werden (vgl. Kriterien 6 und 7 in Kapitel 4.4 und Kapitel 4.5).

Tab. II-16 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefeldes Power-to-Heat

Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieses Technologiefeldes weltweit?

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Technologieführerschaft | <input checked="" type="checkbox"/> wettbewerbsfähig |
| <input type="checkbox"/> nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig | <input type="checkbox"/> abgeschlagen |

Für eine grobe Analyse der nationalen und internationalen Relevanz des Themenfeldes und seine zeitliche Entwicklung wurde eine Publikationsrecherche mittels Scopus (www.scopus.com) mit einer Schlagwortabfrage folgender Syntax durchgeführt:

(„power to heat“ OR „electrification“) AND („industry“ OR „process heat“)

Das Ergebnis der Analyse in Abb. II-7 zeigt ab der Jahrtausendwende eine deutliche Zunahme der Publikationen sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene. 38 von insgesamt 624 Publikationen sind aus Deutschland, entsprechend einem Anteil von 6,1 %. Eine genauere Betrachtung der Titel zeigt jedoch, dass von den 38 nationalen Veröffentlichungen lediglich vier thematisch das hier betrachtete Themenfeld der industriellen PtH-Anwendungen zur Prozesswärmeerzeugung abdecken. Die übrigen Titel sind aus den Bereichen Elektromobilität, Verkehr, Batterie- und Speicherforschung, Effizienz in der Industrie, Antriebsstränge oder sind nicht klar zuzuordnende Exoten wie z. B. ein „Survey of the brown coal industry in Germany in 2008“. Diese Einschränkung zeigt, dass bislang nur wenige Publikationen zu dem hier behandelten industriellen PtH-Technologiefeld existieren. Die steigende Anzahl der Publikationen kann dennoch als Hinweise gewertet werden, dass das Themenfeld PtH an sich nationale und international an Bedeutung gewinnt.

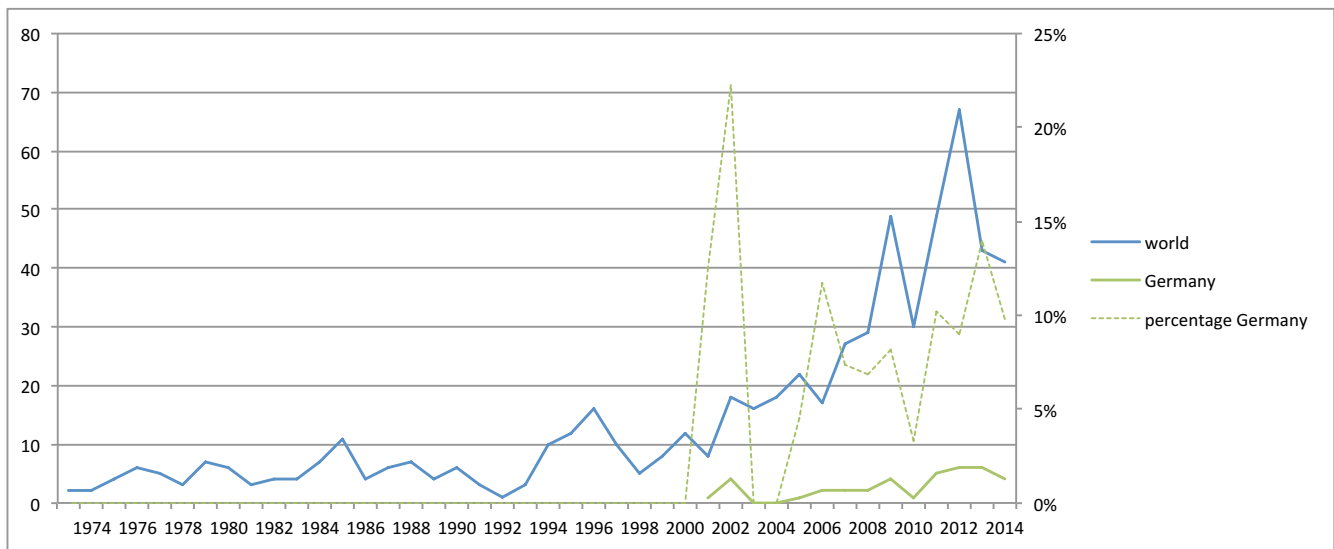


Abb. II-7 Anzahl nationaler und globaler Treffer einer Scopus-Publikationsrecherche für die Begriffe („power to heat“ oder „electrification“) und („industry“ oder „process heat“)

Teilkriterium 8.2 F&E-Budgets

Angaben zu F&E-Budgets der Bundesregierung liegen auf der notwendigen Aggregationsstufe in der Datenbank der IEA²² nicht vor. Die tiefstmögliche Aggregation wird dort durch die Punkte „Industrial techniques and processes“ sowie „Industrial equipment and systems“ gebildet. Insofern sind zu den hier analysierten PtH-Prozessen keine belastbaren Aussagen möglich.

4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz

In Tab. II-17 werden die drei folgenden Betrachtungsebenen der Akzeptanz für das Technologiefeld Power-to-Heat abgeschätzt:

- *Community Acceptance*, auch lokale Akzeptanz genannt, umfasst die Wahrnehmung und Reaktion vor Ort und steht in engem Zusammenhang mit Verfahrensgerechtigkeit und Verteilungsgerechtigkeit bei Planungs- und Entscheidungsprozessen sowie Vertrauen von Anwohnenden auf lokaler Ebene. Diese ist von besonderer Bedeutung im Zusammenhang mit der Platzierung von Anlagen.
- *Market Acceptance* stellt die Ebene der Investoren und Konsumenten dar sowie die intra-organisationale Perspektive (z. B. inwieweit sich Firmen auf erneuerbare Energien in ihrer Unternehmensstrategie einstellen). Deutlichster Indikator ist jeweils die Diffusion einer Technologie, z. B. inwieweit Elektrofahrzeuge tatsächlich gekauft werden.
- *Socio-Political Acceptance* bezieht sich auf das gesellschaftliche Klima bezüglich einer Technologie und ist beeinflusst von der breiten Öffentlichkeit, Politikern und besonders auch von weiteren Schlüsselpersonen und ist somit zugleich gewis-

22

<http://wds.iea.org/WDS/Common/Login/login.aspx>

sermaßen die Summe von und der Rahmen für Community und Market Acceptance.

Dabei wird eine Unterscheidung in hybride und monovalente Betriebsart der elektrifizierten Anlagen vorgenommen, da diese maßgeblich die Auswirkungen der Technologie beeinflusst. Eine monovalente Elektrifizierung erfordert eine Grundlastversorgung mit Strom und somit die Neu- bzw. Zusatzinstallation von erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen und ggf. auch weiterer Infrastrukturen (Netze und Speicher). Dies hat möglicherweise auf der gesellschaftlichen und lokalen Ebene negative Auswirkungen auf die Akzeptanz. Bei der hybriden Nutzung kann ggf. eine solche vorgelagerte Zusatzinvestition entfallen, sofern nur EE-Strom genutzt wird, der ansonsten abgeregelt werden müsste. Jedoch können hier für den Nutzer zusätzliche Investitionen für DSM-Maßnahmen und das Vorhalten hybrider (redundanter) Infrastrukturen entstehen mit entsprechender Auswirkung auf die Marktakzeptanz.

Tab. II-17 Bewertungsraaster für die Akzeptanz des Technologiefeldes Power-to-Heat zum Status Quo (2015) für hybride und monovalente Ausführung

Betriebsart	Ebene Markt		Ebene Gesellschaft		Lokale Ebene	
	(Marktakzeptanz)		(Sozialpol. Akzeptanz)		(Lokale Akzeptanz)	
	Kunden, Haushalte, Nutzer, Industrie: Wie viel investieren Marktakteure?		Sozio-politische Entwicklungen, gesellschaftliche Stimmung / Diskurse; Image		Lokale Konflikte, Klagen, Aktivitäten von Bürgerenergie	
	Bewertung	Begründung / Bedingung	Bewertung	Begründung / Bedingung	Bewertung	Begründung / Bedingung
Hybrid	eher hohe Akzeptanz (2)	wenn Überschuss-Strom billig Produktqualität und Kapazität nicht leidet Aufwand und Investition gering / vertretbar sind	sehr hohe Akzeptanz (1)	wenn nur Überschuss-Strom aus EE-Quellen genutzt wird (Strom wird sonst verworfen)	sehr hohe Akzeptanz (1)	es gibt quasi keine (negativ) Betroffenen
Grundlast (monovalent)	sehr niedrige Akzeptanz (5)	Grundlaststrom zu teuer für Elektrifizierung (im Vergleich zur Referenz)	mittlere Akzeptanz (3)	Akzeptanzfrage offen: Verheizen fossilen Stroms (Effizienz? Ökologie?) notwendiger zusätzlicher EE-Ausbau (Kosten, Landschaftsverbrauch)?	mittlere Akzeptanz (3)	offen oder Ablehnung, sofern Zusammenhang hergestellt wird zwischen zusätzlichen EE-Anlagen und Industriestromnutzung

Bewertung mittels 5-stufiger Skala: Hohe Akzeptanz (1), eher hohe Akzeptanz (2), mittlere Akzeptanz (3), eher niedrige Akzeptanz (4), niedrige Akzeptanz (5)

Im Zeitverlauf könnte sich einerseits die sozialpolitische Akzeptanz erhöhen, wenn die Einsicht reift, dass zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele eine Elektrifizierung für industrielle Prozesse unerlässlich ist. Andererseits stößt die Akzeptanz

möglicherweise zunehmend auf lokale Widerstände, wenn die Gesellschaft erkennt, dass Elektrifizierung in Grundlast einen erheblichen EE-Ausbau erfordert.

4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

Eine Bewertung der unternehmerisch-technischen Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit ist im Rahmen dieses Technologieberichtes für das sehr disperse Technologiefeld „Power-to-Heat“ nicht möglich, da Planungszeit, Bauzeit, Nutzungsdauer und Investition individuell von der jeweilig zu betrachteten Technologie abhängt und zudem - aufgrund des frühen Entwicklungsstandes - aus heutiger Sicht schwer abschätzbar ist.

Grundsätzlich kann jedoch gesagt werden, dass man bei einer *Hybridisierungsstrategie* an Flexibilität gegenüber dem Referenzfall gewinnt und im ungünstigsten Fall - unerwartet hoher Strompreise bzw. unerwartet geringer Mengen an EE-Überschussstrom - auf das fossile Backup-System zurückgreifen kann. Bei einer *monovalenten Elektrifizierung* legt man sich hingegen längerfristig auf diese Technologie fest und kann nicht mehr flexibel auf hohe Strompreise und / oder knappe Stromangebote reagieren. Wie hoch diese Abhängigkeit ausfällt, muss im Einzelfall beurteilt werden. Es ist jedoch eher von einer langfristigen Bindung auszugehen, beispielsweise beträgt die Lebensdauer von Dampfkesseln zwischen 20 und 30 Jahre, die von Öfen (z. B. in der Stahl-, Glas- oder Zementindustrie) auch 40 Jahre oder mehr.

4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Zur Beurteilung der Abhängigkeit des Technologiefeldes Power-to-Heat von Infrastrukturen wird wieder eine Unterscheidung in hybride (flexible) und monovalente (Grundlast) Betriebsweise vorgenommen (siehe Tab. II-18). Beide Fahrweisen sind von bestehenden Infrastrukturen in Form von Stromleitungen abhängig. Ob die bestehenden Infrastrukturen am Ort der Anwendung (Industriestandort) ausgebaut werden müssen, hängt vom Einzelfall ab, insbesondere davon, ob noch ausreichende Reserven an elektrischer Anschluss- und Übertragungskapazität vorhanden sind. Konventionelle Drehrohröfen in der Zementindustrie benötigen beispielsweise bei einer maximalen Anlagenkapazität in Deutschland von 2.000 - 3.000 t/d ca. 100 MW_{th} und bei bis zu 10.000 t/d (an ausländischen Produktionsstandorten) 300 bis 400 MW_{th} und werden heutzutage mit großen Mengen an Kohle und Ersatzbrennstoffen versorgt²³. Da die Zementindustriestandorte in der Regel in der Peripherie nahe an den Kalkstein-Abbaugebieten gelegen sind (vgl. Schüwer 2016: 7 f.) ist es sehr wahrscheinlich, dass für eine Elektrifizierung keine ausreichenden Stromkapazitäten im Bereich von mehreren hundert Megawatt vorhanden sind.

Für die Nutzung von EE-Überschussstrom sind außerdem ausreichende Übertragungskapazitäten von den Erzeugungsanlagen bis in die verschiedenen Netzebenen erforderlich, um Netzengpässe zu vermeiden. Diese Anforderung gilt sowohl für die hybride als auch für die monovalente Elektrifizierungsstrategie. Bei der monovalenten Elektrifizierung ist zusätzlich ein erheblicher Ausbau an erneuerbaren Stromer-

23

Quelle: Experteninterview mit einem Hersteller von Drehrohröfen

zeugungsanlagen erforderlich, um überhaupt die erforderlichen Strommengen (klimaneutral) bereitstellen zu können. Darüber hinaus müssen ggf. weitere Infrastrukturen (Speicher, Backup-Systeme) ausgebaut oder neu errichtet werden. Eine hybride, flexibilisierte Fahrweise kann umgekehrt helfen, den zukünftigen Ausbaubedarf an Stromspeichern zu reduzieren.

Tab. II-18 Abhängigkeit des Technologiefeldes Power-to-Heat von Infrastrukturen

	Hybrid		Monovalent	
	Ja	Nein	Ja	Nein
Die Nutzung der Technologie(n) ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität

Bei diesem Kriterium geht es darum, Rückwirkungen und positive (Synergien) als auch negative (Konkurrenzen) Wechselwirkungen des Technologiefeldes mit den umgebenden Systemen qualitativ zu beschreiben und den daraus erwachsenden Aufwand für einen Anpassungsbedarf abzuschätzen. Dadurch sollen Risiken und Trade-offs aus Gesamt-Perspektive transparent gemacht werden, die von der Technologie bzw. dem umgebenden System ausgehen.

Um für das Technologiefeld PtH typische Anwendungsfälle zu beschreiben, ist wieder eine Unterscheidung in hybride (elektrische *und* brennstoffbasierte) und monovalente (rein elektrische) Systeme sinnvoll (vgl. ähnliche Vorgehensweise bei den Kriterien 1, 4, 9, 10 und 11).

Teilkriterium 12.1 Rückwirkungen

Für einzelne PtH-Anlagen sind potenzielle Rückwirkungen in Form von Spannungsänderung (Flickern), Phasenverschiebung und unter ungünstigen Umständen auch einer Überlastung in der Regel auf die lokale Ebene des Industriestandortes und ggf. sein vorgelagertes Stromnetz begrenzt. Diese Rückwirkungen sind einerseits abhängig von den Reserven der vorhandenen Anschlusskapazität sowie vorhandener Kompensationseinrichtungen (z. B. für Blindstrom) und andererseits von der Leistungsgröße der PtH-Anlage²⁴. Hierbei ist relevant, ob ein Prozess teilweise bzw. nur ergänzend (hybrid) oder vollständig (monovalent) elektrifiziert wird. Weiterhin ist das individuelle Lastprofil des Prozesses sowie die Potenziale zur Verschiebung des Profils

²⁴

Hier kann der Leistungsbereich von einigen Kilowatt bis zu mehreren hundert Megawatt (Bsp. Zement-Drehrohrofen) betragen. In letzterem Fall wären bereits bei Einzelanlagen Auswirkungen auf vorgelagerte Netze zu erwarten.

(durch Wärme- oder Stromspeicher oder durch flexible Prozessführung) zu beachten.

Bei einem großen Bestand (einer hohen Durchdringung) an PtH-Anlagen sind Rückwirkungen auf das gesamte Stromnetz zu erwarten. Das Ausmaß der Rückwirkungen hängt insbesondere davon ab, ob in hybrider (flexibler) Fahrweise auf das Stromangebot (Über- oder Unterdeckung) im Netz reagiert werden kann oder ob dies in monovalenter Fahrweise nicht oder nur begrenzt möglich ist.

Generell gilt einerseits, dass ein Zubau von PtH ohne Netzanpassung zunehmend zu Rückwirkungen und damit zu Anpassungsbedarf führen wird. Andererseits kann ein regional mit dem EE-Ausbau abgestimmter Zubau von flexiblen PtH-Anlagen auch zu Synergieeffekten mit dem Stromnetz führen, so dass der Anpassungsbedarf reduziert wird. Hier sollte es das Ziel sein, dass PtH-Anlagen auf lokaler bzw. regionaler Ebene EE-Überschussstrom nutzen, der sonst abgeregelt werden müsste. Dies kann zu vermiedenem oder herausgezögertem Netzausbau sowie zu einer Reduzierung von Netzverlusten führen.

Insgesamt ergibt sich durch die Verlagerung des Einsatzes von Brennstoffen zu Elektrizität im Industriesektor sowohl ein erhöhter (nationaler) Strombedarf als auch ein erhöhter Leistungsbedarf.

Teilkriterium 12.2 Anpassungsbedarf

Im Einzelfall können ggf. Optimierungen bzw. Verstärkungen des lokalen Stromnetzes z. B. durch regelbare Ortsnetztransformatoren, neue leistungsstärkere Betriebsmittel und etwaige Kompensationseinrichtungen oder auch ein anderer Netzan-schlusspunkt erforderlich sein.

Bei der Errichtung von PtH-Anlagen im großen Maßstab (hohe Marktdurchdringung) können darüber hinaus auch Maßnahmen zur Optimierung und Kapazitätserhöhung in vorgelagerten Stromnetzen bis zur Übertragungsebene erforderlich werden. Eine Kapazitätserhöhung ist sowohl für die hybride als auch für die monovalente Betriebsweise erforderlich, da in beiden Fällen zu bestimmten Zeiten ausreichend Transportkapazität erforderlich sein muss. Bei flexibler Fahrweise kann der notwendige Ausbaubedarf eventuell geringer sein. Dies setzt jedoch zusätzlich die Errichtung und den Einsatz von (intelligenten) Regeleinrichtungen in Form von Informations-, Kommunikations- und Fernwirktechnik voraus (Smart Grids, Registrierende-Leistungs-Messung²⁵ bzw. Demand-Side-Management).

Für die flexible Fahrweise von PtH sind zudem entweder größere Gesamtsysteme oder zusätzliche Wärmespeicher im Vergleich zur unflexiblen Anlage vorzusehen, um die Wärmenachfrage jederzeit erfüllen zu können.

Ein Betrieb von PtH-Anlagen in der Grundlast erfordert darüber hinaus zwingend einen überproportionalen Ausbau erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten, sofern die Elektrifizierung zur Dekarbonisierung industrieller Prozesse beitragen soll. Des Weiteren wird - insbesondere bei monovalent betriebenen Anlagen - eine Kapazitäts-

25

Die Registrierende-Leistungs-Messung (RLM) in viertelstündlicher Auflösung wird in der Regel bei Kunden mit einem Jahresverbrauch von mehr als 100 MWh eingesetzt.

erhöhung bei der Stromerzeugung allgemein in Form zusätzlicher (Spitzenlast-) Kraftwerke oder Speicher benötigt. Der Anstieg des Leistungsbedarfs kann jedoch zumindest bei flexibilisierten Prozessen durch Demand-Side-Management (DSM) Maßnahmen kompensiert werden.

Teilkriterium 12.3 Wechselwirkungen

Eine intelligent betriebene Nutzung von PtH-Anlagen setzt eine entsprechende Digitalisierung der Infrastrukturen voraus. Im Einzelfall können flexibilisierte industrielle PtH-Anlagen in begrenztem Umfang auch zur Reduzierung der lokalen Netzbelastung z. B. durch *Peak Shaving* genutzt werden. Sie können ggf. aber auch in Konkurrenz zu anderen lokalen DSM- und Speicher-Optionen (z. B. Elektrofahrzeugen oder Batterien) oder anderen PtH-Lösungen (z. B. Wärmepumpen oder Elektrodenkessel in der Fernwärme) stehen.

Bei einem großen Bestand an PtH-Anlagen im geregelten DSM-Einsatz kann zum einen die Netzbelastung reduziert werden. Zum anderen ist auf regionaler Ebene ggf. möglich, dass die Abregelung von fluktuierend einspeisenden regenerativen Stromerzeugern verhindert oder reduziert werden kann. Mit welcher Ausprägung sich die zuvor genannten Fälle verteilen, hängt davon ab, inwieweit die Prozesse flexibilisiert werden bzw. überhaupt flexibilisierbar sind und wie gut der räumliche Austausch über die Stromnetze funktioniert. Im ungünstigsten Fall - einer weitgehend monovalenten und inflexiblen Fahrweise auf der Nachfrageseite und einer nicht ausreichenden erneuerbaren Stromerzeugung und Speicherung auf der Angebotsseite - kann die Elektrifizierung zu einem höheren fossilen Brennstoffbedarf in konventionellen Kraftwerken und somit zu erhöhten CO₂-Emissionen führen. Dies gilt auch in dem Fall, dass ein Netzengpass die Kopplung von EE-Stromerzeugung und flexibler Nachfrage durch die PtH-Anlagen verhindert bzw. schwächt. Dieses Szenario unterstreicht die Notwendigkeit, die Elektrifizierung, den EE-Ausbau sowie den Netzausbau in einer gemeinsamen Strategie zu denken.

5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand

Die Handlungsempfehlungen werden in die Ebenen *Einzeltechnologien* und *Gesamtes Technologiefeld PtH* gegliedert. Die zweite (übergeordnete) Ebene betrachtet auch die Wechselwirkungen mit anderen Klimaschutzstrategien.

5.1 Einzeltechnologien

Einen Sonderfall stellt die *elektrische Dampferzeugung* dar, die weitgehend branchenunabhängig technisch realisierbar ist und wo bereits einzelne Demonstratoren entwickelt wurden. Hier wäre zu überlegen, ob die Entwicklung standardisierter Hybridverfahren für verschiedene Leistungsgrößen und Dampfparameter gefördert werden sollte, um den Einsatz von preisgünstigen und flexiblen PtH-Verfahren als marktfähige Querschnittstechnologie zu etablieren.

Bei der Elektrifizierung *brennstoffbezogener Prozesse* ist eine stärkere Differenzierung sowohl auf der Seite der Technologien als auch auf der Seite der Branchen und Prozesse (z. B. in der chemischen Industrie) erforderlich. Auch wenn die grundsätzlich anwendbaren direkten (induktiv / konduktiv / dielektrisch) und indirekten Verfahren (indirekte Widerstands- / Lichtbogen- / Infrarot-Erwärmung) für sich - z. T. allerdings nur in Nischen - als erprobt angesehen werden können, so gibt es dennoch in vielen Fällen noch erheblichen Entwicklungsbedarf, um für bestimmte Branchen und deren Prozesse angepasste, effiziente und kostengünstige Elektrifizierungsverfahren zu konzipieren.

Die eigentliche Herausforderung besteht dabei in der Integration der elektrischen Erwärmungstechnologien in die unterschiedlichen Produktions- und Verarbeitungsprozesse. Forschungsbedarf besteht außerdem in der Frage, wie die Prozessanwendungen technisch und organisatorisch flexibilisiert werden können und inwieweit die Flexibilisierung zu Effizienzeinbußen führt, siehe z. B. (Ecofys 2016). Als für die Elektrifizierung von Prozesswärme relevant werden insbesondere folgende Branchen angesehen:

- Papier und Pappe
- Raffinerien
- Grundstoffchemie
- Glas, Keramik
- Zement, Kalk, Ziegel
- Eisen & Stahl
- NE-Metalle & Eisengießereien

Die (monovalente) Elektrifizierung in der Grundlast ist - bei dem gegenwärtigen und auch mittelfristig zu erwartendem Spread zwischen Gas- und Strompreisen - in vielen Fällen nicht wirtschaftlich darstellbar. Aus diesem Grund beschränken sich kurz- und mittelfristig mögliche Anwendungen auf die (hybride) Flexibilisierung und auf Verfahren, die zusätzliche Vorteile z. B. hinsichtlich Produktqualität oder Produktoutput (Prozessgeschwindigkeit) versprechen. Daher erscheint ein vielversprechender Ansatz, sowohl die PtH-Flexibilisierungspotenziale als auch die produkt- und prozessspezifischen Co-Benefits einer Elektrifizierung systematisch für einzelne Branchen zu untersuchen (Querbezug zur nachfolgenden Empfehlung in Kapitel 5.2).

Beispielsweise wird noch ein erhebliches Entwicklungspotenzial bezüglich des gezielten Einsatzes einer Strömungsbewegung oder -Dämpfung in *konduktiven Erwärmungsprozessen* in der Metallindustrie gesehen (Pfeifer 2013: 266), um neue oder verbesserte Eigenschaften von Werkstoffen (z. B. beim Strangpressen, bei der Erstarrung spezieller Legierungen und bei der Halbleiterkristallzüchtung für Mikro- und Leistungselektronik oder Photovoltaik) zu produzieren. Auch die *dielektrische Erwärmung*, die komplementär zur induktiven Erwärmung für elektrisch schwach leitfähige Materialien geeignet ist, bietet noch Entwicklungs- und Anwendungspotenziale in Richtung reduzierter Erwärmungszeiten und dadurch erheblich reduzierte Energiebedarfe (Pfeifer 2013: 266), zum Beispiel beim mikrowellenunterstützten Sintern von Keramiken und dem Entbindern beim Spritzgießen keramischer Massen (Pfeifer 2013: 295). Die *Elektronenstrahl-Erwärmung* bietet noch Potenzial bei der Reduzierung der Investitionskosten und der Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit (Pfeifer 2013: 326).

Neben einer Effizienzverbesserung und einer Reduktion der Emissionen kann eine gezielte Forschungsförderung in die Optimierung der oben genannten Prozesse indirekt (über Co-Benefits) die Anreize zur Elektrifizierung erhöhen.

Beispielsweise wird bei der Kalzinierung im Kalkofen bzw. die gekoppelte Kalzinierung und Sinterung im Zementofen (Drehrohrofen) bei der Zementherstellung im Falle der Elektrifizierung der apparativer Aufwand als einfach(er) eingeschätzt, da u. a. keine Zuluft- und Brenngaskonditionierung erforderlich ist. Als Co-Benefit könnten außerdem hochreine CO₂-Ströme als Nebenprodukt der Elektrifizierung in relevanten Mengen - z. B. zur Gas-Synthese mit erneuerbarem Wasserstoff - nutzbar gemacht werden. Allerdings müssten hier thermodynamische und prozesstechnische Neuentwicklungen vollzogen werden, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt angesichts der sehr niedrigen Referenzbrennstoffkosten und angesichts der notwendigen Zuführung sehr hoher Energiemengen bzw. Leistungen auf dem Markt nur dort einen Abnehmer finden würde, wo (erneuerbarer) Strom in großen Mengen preisgünstig zur Verfügung steht. Alternativ könnte eine hybride elektrische Luftvorwärmung im bestehenden Systemen (mit Anpassungen) z. B. durch Einblasen elektrisch erhitzter Luft oder durch den direkten Einsatz von Widerstandsheizelementen entwickelt werden.

5.2 Gesamtes Technologiefeld PtH und Wechselwirkungen mit anderen Klimaschutzstrategien

Insgesamt gibt es in der Literatur bisher nur wenige nationale und internationale Arbeiten, die sich mit den Potenzialen einer vollständigen Elektrifizierung industrieller Prozesswärme systematisch und unter Betrachtung zukünftig möglicher Dynamiken auseinandersetzen. Hier besteht noch Forschungsbedarf, insbesondere was die Untersuchung der technischen, wirtschaftlichen und Umsetzungs- bzw. Marktpotenziale für einzelne Branchen und Prozesse betrifft. Weitere Untersuchungen sind zudem erforderlich im Bereich Flexibilisierung der Prozesse (DSM-Potenziale) und deren Auswirkungen sowie im Themenfeld Anpassung des Strommarktdesigns (Flexibilisierung der Strompreisbestandteile). Thermische Speicher können eine wichtige Aufgabe bei der Flexibilisierung und Sektorkopplung industrieller Prozesse über-

nehmen. Insbesondere auch für den bei Industrieprozessen relevanten Hochtemperaturbereich besteht hier noch F&E-Bedarf (FVEE 2017: 25).

Die Elektrifizierung ist eine wichtige Option, um (langfristig) hohe CO₂-Einsparungen auch im industriellen Sektor erreichen zu können. Wie bereits weiter oben im Bericht dargelegt, ist die Elektrifizierung an sich jedoch weder ein Garant für die Reduktion der Treibhausgase noch zur Einsparung von Primärenergie. Dies zeigen u. a. die Szenarien-Berechnungen in Tab. II-12 (THG) und Tab. II-14 (PE).

Dies unterstreicht einerseits, dass anstelle der direkten Elektrifizierung die etwa zwei bis fünfmal effizienteren Wärmepumpen überall dort zum Einsatz kommen sollten, wo es das Temperaturniveau und der Anwendungsfall erlauben. Daher wird der Forschung und Entwicklung von industriellen *Hochtemperatur-Wärmepumpen*²⁶ eine sehr große Bedeutung zugewiesen - insbesondere auch in Verbindung mit der Nutzung von *Abwärmequellen*.

Andererseits sei noch mal die Notwendigkeit betont, dass die Elektrifizierung und der EE-Ausbau (inklusive weiterer Infrastrukturen wie Netze und Speicher) in einer gemeinsamen Strategie gedacht werden müssen. Um diesen Entwicklungsprozess zu begleiten, sind weitere und kontinuierlich durchgeführte *systemische Forschungs- und Monitoring-Arbeiten* erforderlich.

5.3 Ergebnis der Online-Umfrage

In Abb. II-8 ist das Ergebnis der Online-Umfrage unter den BMWi-Forschungsnetzwerken vom April 2017 grafisch für das Technologiefeld *Power-to-Heat* wiedergegeben. Hier ist die klare Tendenz zu erkennen, dass der Schwerpunkt der Antworten sowohl beim Marktpotenzial als auch beim Forschungsbedarf (Range: 1 bis 5, Mittelwert: 3,78) im rechten oberen Quadranten liegt: 105 von 121 (87 %) der Befragten halten für die nationale Ebene und 97 von 115 (84 %) für die internationale Ebene das Marktpotenzial für mittel bis groß. Die Einschätzung des öffentlichen Forschungsbedarfs korrespondiert hiermit weitgehend.

²⁶

Siehe dazu den *Technologiebericht 6.2: Energieeffiziente Querschnittstechnologien*.

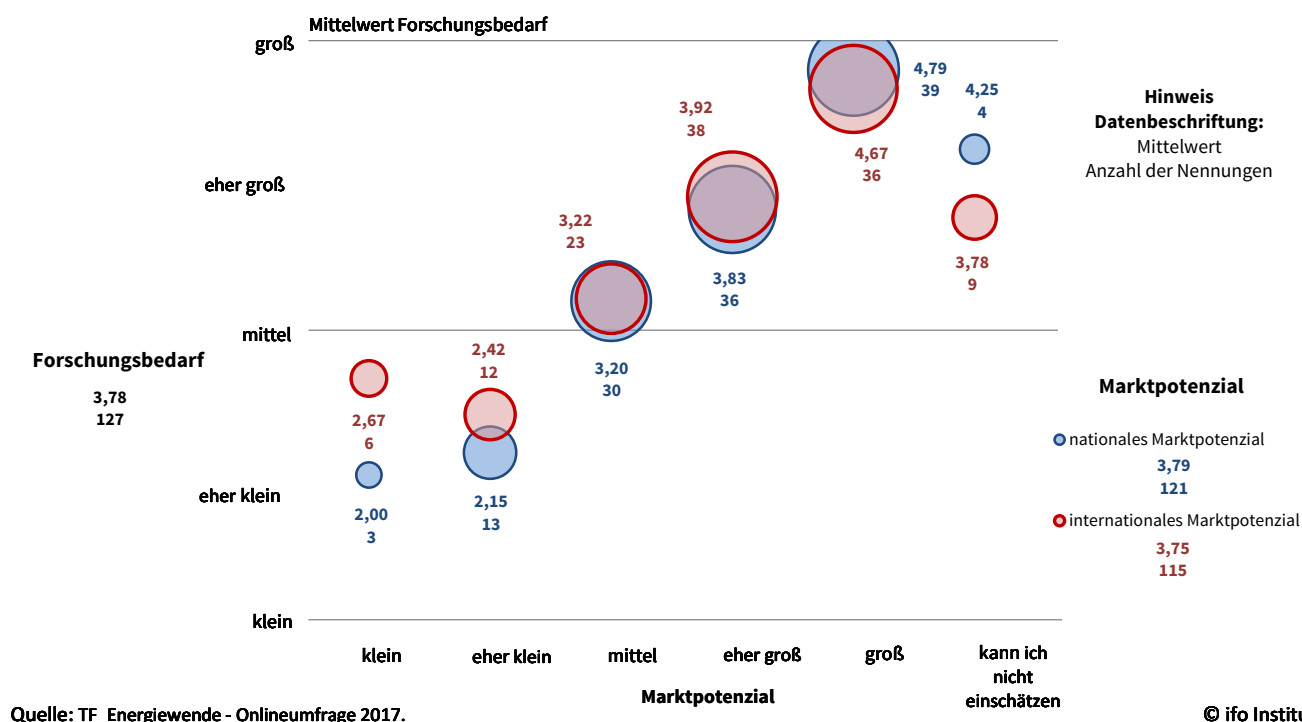


Abb. II-8 Ergebnis der Online-Befragung zu Forschungsbedarf und Marktpotenzial im Technologiefeld Power-to-Heat für Industrieprozesse (Dampferzeugung, Industrieöfen etc.)

Quelle: ifo Institut (2017)

Literaturverzeichnis

- AGEB (2016): Bilanz 2014 - Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2014. Excel-Datei. Berlin: Im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen bearbeitet von DIW Berlin und Energy Environment Forecast Analysis (EEFA). www.ag-energiebilanzen.de. Letzter Zugriff: 28. März 2017.
- Al-Salem, S. M.; Lettieri, P.; Baeyens, J. (2009): Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management* 29(10)2625–2643.
- Bechem, H.; Blesl, M.; Brunner, M. (2015): Potenziale für Strom im Wärmemarkt bis 2050 - Wärmeversorgung in flexiblen Energieversorgungssystemen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien. Frankfurt a.M.: VDE - Energietechnische Gesellschaft (ETG).
www.energiesdialog2050.de/index.php/downloads/category/4-fruehstuecke-2015?download=6:11-06-2015-vde-studie-potenziale-fuer-strom-im-waermemarkt-bis-2050. Letzter Zugriff: 12. April 2017.
- BINE (Hrsg.) (2014): BINE Projekt-Info 05/14: Spezialglas energiesparend herstellen. Fachinformationszentrum (FIZ) Karlsruhe GmbH.
<http://www.bine.info/themen/industrie-gewerbe/prozesswaerme/publikation/spezialglas-energiesparend-herstellen>. Letzter Zugriff: 19. Juni 2013.
- Brems, A.; Baeyens, J.; Dewil, R. (2012): Recycling and recovery of post-consumer plastic solid waste in a European context. *Thermal Science* 16(3)669–685.
- Brems, A.; Dewil, R.; Baeyens, J.; Zhang, R. (2013): Gasification of plastic waste as waste-to-energy or waste-to-syngas recovery route. *Natural Science* 05(06)695–704.
- Cefic (2013): European chemistry for growth - Unlocking a competitive, low carbon and energy efficient future. Brüssel.
- Ecofys (2016): Flex-Efficiency - Ein Konzept zur Integration von Effizienz und Flexibilität bei industriellen Verbrauchern. Studie. Köln: Ecofys im Auftrag von Agora Energiewende. www.agora-energiewende.de/de/themen/-agothem-/Produkt/produkt/286/Flex-Efficiency/. Letzter Zugriff: 07. Juni 2017.
- EU (2016): DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) 2015/2402 DER KOMMISSION vom 12. Oktober 2015 zur Überarbeitung der harmonisierten Wirkungsgrad-Referenzwerte für die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme gemäß der Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung des Durchführungsbeschlusses 2011/877/EU der Kommission.
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32015R2402>. Letzter Zugriff: 03. April 2017.
- Fattouh, B.; Brown, C. (2014): US NGLs Production and Steam Cracker Substitution : What will the Spillover Effects be in Global Petrochemical Markets? Oxford.
- Fraunhofer ISI; IREES GmbH; Hassan, A. (2011): Möglichkeiten, Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs und der

- CO₂-Emissionen von industriellen Branchentechnologien durch Prozessoptimierung und Einführung neuer Verfahrenstechniken. Karlsruhe, Berlin: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung; Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien.
- FVEE (2017): Forschungsziele 2017 - Gemeinsam forschen für die Energie der Zukunft. Broschüre. Berlin: ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE). www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Programmbroschuere/fz2017/fz2017.pdf. Letzter Zugriff: 08. Juni 2017.
- Görner, K.; Oeljeklaus, G.; Bockhorn, H.; Pfeifer, H.; Hoenig, V.; Hoppe, H.; Fleiger, K. (2015): Umwandlungsprozesse bei fossilen Energieträgern. In M. Fischedick, K. Görner, und M. Thomeczek (Hrsg.), CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Gruber, A.; Biedermann, F.; von Roon, S. (2015): Industrielles Power-to-Heat Potenzial. 9. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien (IEWT 2015). München: FfE Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH. <https://www.ffegmbh.de/aktuelles/veroeffentlichungen-und-fachvortraege/517-iewt-2015-industrielles-power-2-heat-potenzial>. Letzter Zugriff: 27. März 2017.
- Guminski, A. (2015): Transition Towards an “All-electric World” – Developing a Merit-Order of Electrification for the German Energy System (Masterthesis). Masterarbeit. München: Technische Universität München (TUM). https://www.ffegmbh.de/images/stories/pressemitteilung/634_GEE-Preis/Masterarbeit_AllElectricWorld_Guminski_GEE.pdf. Letzter Zugriff: 27. März 2017.
- Guminski, A.; von Roon, S. (2017): Transition Towards an “All-electric World” – Developing a Merit-Order of Electrification for the German Energy System (Paper). Paper. 10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien (IEWT 2017). München: Technische Universität München (TUM). www.eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at_pages/events/iewt/iewt2017/html/files/fullpapers/165_Guminski_fullpaper_2017-01-30_23-56.pdf. Letzter Zugriff: 27. März 2017.
- IEA - International Energy Agency (2013): Technology Roadmap Energy and GHG Reductions in the Chemical Industry via Catalytic Processes. Paris Cedex, France: Corlet.
- ifo Institut (2017): Auswertung der Online-Umfrage unter den BMWi-Forschungsnetzwerken vom April 2017, Teilbereich TF_Energiewende. München.
- Joint Research Centre (JRC) (2013): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass (BREF Glass). No. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). JRC Reference Report. Seville: European Commission Joint Research Centre - Institute for Prospective Technological Studies (JRC-IPTS). http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/GLS_Adopted_03_2012.pdf. Letzter Zugriff: 13. April 2017.

- Kleimaier, M. (2016): Potenziale für Strom im Wärmemarkt bis 2050 - Wärmeversorgung in flexiblen Energieversorgungssystemen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien. Gehalten auf der efzn-Tagung „Sektorenkopplung der Energiesysteme durch Power to Heat“, Präsentation, Goslar.
https://www.efzn.de/fileadmin/Veranstaltungen/Power_to_Heat/P2H_2016_Vortrag_C3_A4ge/02_KLEIMAIR_Dialogplattform_P2H_VDE_14-06.2016.pdf. Letzter Zugriff: 12. April 2017.
- Krzikalla, N.; Achner, S.; Brühl, S. (2013): Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus erneuerbaren Energien. Aachen: BET - Büro für Energiewirtschaft und technische Planung. https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Plattform/BEE-Plattform-Systemtransformation_Ausgleichsmoeglichkeiten.pdf. Letzter Zugriff: 12. April 2017.
- Lechtenböhmer, S.; Nilsson, L. J.; Åhman, M.; Schneider, C. (2016): Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification – Implications for future EU electricity demand. *Energy, Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 115, Part 3 1623–1631.
- Lindner, C.; Hoffmann, O. (2015): Analyse/Beschreibung der derzeitigen Situation der stofflichen und energetischen Verwertung von Kunststoffabfällen in Deutschland. Düsseldorf / Alzenau.
- ÖI; FH ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin: Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI.
- Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin, Karlsruhe
- Paar, A.; Herbert, F.; Pehnt, M.; Ochse, S.; Richter, S.; Maier, S.; et al. (2013): Transformationsstrategien von fossiler zentraler Fernwärmeversorgung zu Netzen mit höheren Anteilen erneuerbarer Energien. Endbericht. Heidelberg, Leimen, Frankfurt a. M.: ifeu GmbH, GEF Ingenieur AG, AGFW e.V.
www.ifeu.de/energie/pdf/TRAFO_final_Endbericht.pdf. Letzter Zugriff: 01. September 2014.
- Pfeifer, H. (2013): Handbuch Industrielle Wärmetechnik - Grundlagen - Berechnungen - Verfahren (5.). Essen: Vulkan-Verlag. <http://d-nb.info/1038398673>. Letzter Zugriff: 07. April 2017.
- Plastics Europe (2016): *Plastics – the Facts 2016 - An analysis of European plastics production, demand and waste data*. Brüssel.
- Prognos AG; EWI; gws (2014): *Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose*. Basel, Köln, Osnabrück: Prognos; Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln; Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung.
- Quaschnig, V. (2016): *Sektorkopplung durch die Energiewende - Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung*. Berlin: Hochschule für Technik

- und Wirtschaft HTW Berlin. <https://pvspeicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/2016/05/HTW-2016-Sektorkopplungsstudie.pdf>. Letzter Zugriff: 27. März 2017.
- Ren, T. (2009): Petrochemicals from oil, natural gas, coal and biomass: Energy use, economics and innovation. S.l.: [s.n.].
- von Roon, S.; Dufta, C. (2016): Workshop zur Methodenentwicklung SynErgie AP „Potenzialanalyse der Grundstoffindustrien“. Gehalten auf der Workshop zur Methodenentwicklung (Projekt SynErgie), Präsentation, Frankfurt a.M.
- Sadrameli, S. M. (o. J.): Thermal/catalytic cracking of hydrocarbons for the production of olefins: A state-of-the-art review I: Thermal cracking review. Fuel 140102–115.
- Samadi, S.; Lechtenböhmer, S.; Schneider, C.; Arnold, K.; Fishedick, M.; Schüwer, D.; Pastowski, A. (2016): Decarbonization Pathways for the Industrial Cluster of the Port of Rotterdam. Wuppertal: Wuppertal Institut.
- Schüwer, D. (2016): Abwärmenutzungspotenziale in NRW - Vorstellung der aktuellen Studie im Auftrag des MKULNV. Gehalten auf der Tagung der EA-NRW „Sektorübergreifende Transformation unseres Energiesystems“, Vortrag, Düsseldorf. <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/581>. Letzter Zugriff: 05. April 2017.
- StatBA (2016): Input-Output-Tabellen zur Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung. Berechnungen für das Jahr 2012 (Revision 2014). Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- StatBA (2017): Produzierendes Gewerbe - Produktion des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Tukker, A.; de Groot, H.; Simons, L.; Wiegersma, S. (1999): Chemical Recycling of Plastic Waste (PVC and other resins). Delft.
- UBA (2016): Climate Change 26/2016: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_26_2016_entwicklung_der_spezifischen_kohlendioxid-emissionen_des_deutschen_strommix.pdf. Letzter Zugriff: 03 April 2017.
- Wilts, H.; von Gries, N.; Rademacher, B.; Peters, Y. (2015): Einsparpotenziale beim Kunststoffeinsatz durch Industrie, Handel und Haushalte in Deutschland. Wuppertal.
- Wolf, S.; Fahl, U.; Blesl, M.; Voß, A.; Jakobs, R. (2014): Analyse des Potenzials von Industriewärmepumpen in Deutschland. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) / Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik (IZW). www.ier-stuttgart.de/publikationen/veroeffentlichungen/forschungsberichte/downloads/141216_Abschlussbericht_FKZ_0327514A.pdf. Letzter Zugriff: 07. Juni 2017.

Wolf, S.; Lambauer, J.; Fahl, U.; Blesl, M.; Voß, A. (2012): Industrial heat pumps in Germany: Potentials, technological development and market barriers (4-082-12). ECEEE Proceeding No. 4-082-12. Stuttgart: Institute for Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER).
<http://proceedings.eceee.org/visabstrakt.php?event=2&doc=4-082-12>. Letzter Zugriff: 07. Juni 2017.